

ระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย
WIRELESS BALL FLOATING CONTROL SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อปีการศึกษา 2563 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

WIRELESS BALL FLOATING CONTROL SYSTEM



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์เป็นอย่างชัดเจน

SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2020

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย
Wireless Ball Floating Control System

ผู้จัดทำ นางสาวปานชีวา มาลัยทอง 60010605
นางสาวพรพิมล จันทร์กล้า 60011295



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณดี เพชรมณีล้ำค่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย

โดย

นางสาวปณชิวา มาลัยทอง 60010605

นางสาวพรพิมล จัทร์กลับ 60011295

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณดี เพชรมณีล้ำค่า

ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายให้มีคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน โดยนำเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) มาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาและต่อยอดระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายให้เข้ากับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นปัจจุบัน เนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส COVID-19 ที่ส่งผลกระทบต่อให้การปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการเป็นไปได้อย่างยากลำบาก โดยระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายที่พัฒนาขึ้นนั้น ผู้ใช้งานสามารถรับส่งข้อมูลเพื่อสั่งงานและควบคุมระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย โดยสามารถเลือกฟังก์ชันการทำงานได้ รวมถึงการแสดงผลผ่านระบบแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนหรือแท็บเล็ตได้

ขั้นตอนในการดำเนินงานเริ่มจากศึกษาการทำงานของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย ศึกษาและออกแบบวงจรควบคุมการทำงาน ประกอบด้วยบอร์ดควบคุม Arduino nano 33 IoT เซนเซอร์ตรวจจับระยะทางแบบอินฟาเรด GP2Y0A21 และพัลลวมกระแสดตรง ทำการเขียนโปรแกรมด้วย Arduino เพื่อควบคุมการทำงาน จากนั้นเขียนโปรแกรมด้วยแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อทำการเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายแบบไร้สายและสามารถใช้งานบนสมาร์ตโฟนได้ สุดท้ายทดสอบระบบการทำงานทั้งหมดและปรับแก้ไขให้ทำงานตามที่ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้รู้เห็นแต่เพียงผู้เดียวในการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Wireless Ball Floating Control System

By

Miss Parnchiva Malaithong 60010605

Miss Ponpimon Chanklub 60011295

Advisor

Assoc.Prof.Dr. Wandee Petchmaneelumka

Academic Year 2020

ABSTRACT

This thesis presents the design of a wireless ball floating control system which has functions for user requirements. Internet of Things (IoT) technology is applied for wireless ball floating control system. Due to the COVID-19 epidemic situation, it is difficult to work in the laboratory. The operation of the developed system can send and receive data to control the ball floating control system wirelessly. The operating function including display can be selected through the application system on smartphones or tablets.

The procedure starts with studying the operation of a wireless ball floating control system. Then, the circuits for control is studied and designed including an Arduino nano 33 IoT control board, a GP2Y0A21 distance measuring infrared sensor, and a DC fan. Arduino IDE is used for programming to control the system. After that Blynk application is used to connect a wireless network via smartphone. Finally, the entire system is tested and modified it to work as designed.

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาช่วยเหลือ แนะนำ ให้คำปรึกษา และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความความเอาใจใส่อย่างยิ่ง จากอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณดี เพชรมณีล้ำค่า ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ตลอดระยะเวลาในการศึกษาจนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินงานให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ได้อย่างลุล่วงสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ธีรรัฐจา ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่กรุณาเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุม ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษา อันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิณัย ฤกษ์รัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่กรุณาเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือวัด ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และตรวจสอบการทำงานของระบบ จนกระทั่งสามารถดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ นายศุภวัฒน์ ชัยสวัสดิ์ ที่กรุณาเป็นผู้ร่วมให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในเรื่องของการต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การทำงานของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ต่างๆ ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นได้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ท่านอื่นๆ ในหลักสูตรวิศวกรรมระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ในความอนุเคราะห์ที่ช่วยเหลือในการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำโครงการนี้ จึงทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

คณะผู้จัดทำ

ปานชีวา มาลัยทอง

พรพิมล จันทร์กลั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญาานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 รายละเอียดของปริญญาานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พลังงานลมและอากาศพลศาสตร์	4
2.2 กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	4
2.3 แรงโน้มถ่วงของโลก	6
2.4 พลศาสตร์ของไหล	6
2.4.1 ของไหล	6
2.4.2 คุณสมบัติของของไหลในอุดมคติ	7
2.4.3 สมการความต่อเนื่อง	7
2.4.4 สมการของแบร์นูลลี	8
2.5 ระบบควบคุม	8
2.5.1 พื้นฐานของระบบควบคุมแบบวงเปิดและวงปิด	8
2.5.2 ระบบควบคุมพีไอดี	9
2.5.3 คุณสมบัติของระบบควบคุมแบบพีไอดี	11
2.5.4 การปรับจูนค่าคงที่ของตัวควบคุม	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	17
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	17
3.2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง	17
3.2.1 บอร์ด Arduino nano 33 IoT	17
3.2.2 เซนเซอร์ GP2Y0A21 Sharp Infrared Sensor 10-80 cm	18
3.2.3 Switching Power Supply 12V 5A	20
3.2.4 DC Fan (4 Wire)	21
3.2.5 LM2596HVS High voltage Step down 5-48V to 1.25-26V	21
3.3 ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง	21
3.3.1 Arduino IDE	21
3.3.2 Visual Studio	22
3.3.3 TinkerCAD	22
3.3.4 Blynk Application	23
3.4 การออกแบบและการวางแผนการทำงาน	23
3.4.1 การออกแบบและการวางแผนทางด้านฮาร์ดแวร์	23
3.4.2 การออกแบบและการวางแผนทางด้านซอฟต์แวร์	23
3.5 วิธีการดำเนินงาน	24
3.5.1 การทดสอบเซนเซอร์	24
3.5.2 การทดสอบการทำงานของพัดลม	26
3.5.3 การเขียนโปรแกรม Arduino	27
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	31
4.1 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย	31
4.2 ผลการออกแบบหน้าแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk	31
4.3 ผลการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย	32
4.4 การทดสอบการทำงาน	34
4.4.1 ทดสอบการรับ-ส่งข้อมูล และการแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โหมดอัตโนมัติ (Automation mode)	34
4.4.2 ทดสอบการรับ-ส่งข้อมูล และการแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โหมดการปรับด้วยมือ (Manual mode)	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิยอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการทดสอบการควบคุมระบบ	35
4.5.1 ผลการทดสอบการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ P controller	36
4.5.2 ผลการทดสอบการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PI controller	37
4.5.3 ผลการทดสอบการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PD controller	38
4.5.4 ผลการทดสอบการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PID controller	39
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	41
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	41
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน	41
5.3 แนวทางการแก้ไขปัญหา	42
5.4 การพัฒนาในอนาคต	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก	44
ภาคผนวก ก เซนเซอร์ GP2Y0A21 Sharp Infrared Sensor 10-80 cm	45
ภาคผนวก ข บอร์ด Arduino nano 33 IoT	47
ภาคผนวก ค โปรแกรมควบคุมการทำงานและการแสดงผล	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and ^{VI} cite the document when use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ทิศทางของแรงต้านอากาศ	4
2.2 การไหลของของไหลภายในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ	7
2.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพื้นฐาน	8
2.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับ	9
2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี	10
2.6 กราฟผลการตอบสนองของ PV (Process Value)	13
2.7 กราฟของ Quarter-amplitude	13
2.8 การปรับจูนระบบโดยใช้วิธี Ziegler-Nichols Close-Loop tuning	13
3.1 บอร์ด Arduino nano 33 IoT	18
3.2 GP2Y0A21 Sharp Infrared Sensor 10-80 cm	18
3.3 จุด Light emitter และ Light detector (PSD)	18
3.4 ตำแหน่งของวัตถุเปลี่ยนไปและตำแหน่งของจุดบน PSD	19
3.5 กราฟการวัดระยะทาง (เอาต์พุต)	19
3.6 ตัวอย่างของการสอบเทียบค่า	20
3.7 Switching Power Supply 12V 5A	20
3.8 พัดลม DC 12V 0.86A	21
3.9 Step down 5-48V to 1.25-26V.3	21
3.10 สัญลักษณ์โปรแกรม Arduino IDE	21
3.11 สัญลักษณ์โปรแกรม Visual Studio	22
3.12 สัญลักษณ์โปรแกรม TinkerCAD	22
3.13 สัญลักษณ์แอปพลิเคชัน Blynk	23
3.14 วงจรการต่อเซนเซอร์กับบอร์ด Arduino nano 33 IoT	24
3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าแรงดันเอาต์พุต	25
3.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าส่วนกลับ แรงดันเอาต์พุตในช่วง 10 – 80 cm	25
3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าส่วนกลับ แรงดันเอาต์พุตในช่วง 10 – 40 cm	26
3.18 การต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	26
3.19 วงจรการต่อพัดลมกับบอร์ด Arduino nano 33 IoT	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 หน้าต่างโปรแกรม Arduino (1)	27
3.21 หน้าต่างโปรแกรม Arduino (2)	28
3.22 หน้าต่างโปรแกรม Arduino (3)	28
3.23 หน้าต่างโปรแกรม Arduino (4)	29
3.24 หน้าต่างโปรแกรม Arduino (5)	29
4.1 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย	31
4.2 หน้าแอปพลิเคชัน Blynk ที่ออกแบบ	32
4.3 ชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย	33
4.4 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย	33
4.5 การควบคุมระบบผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โหมดอัตโนมัติ	34
4.6 การควบคุมระบบผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โหมดปรับด้วยมือ	35
4.7 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ P Controller ที่จุด Set point 25%	36
4.8 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ P Controller ที่จุด Set point 50%	36
4.9 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PI Controller ที่จุด Set point 25%	37
4.10 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PI Controller ที่จุด Set point 50%	37
4.11 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PD Controller ที่จุด Set point 25%	38
4.12 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PD Controller ที่จุด Set point 50%	38
4.13 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PID Controller ที่จุด Set point 25%	39
4.14 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PID Controller ที่จุด Set point 50%	39
ก.1 คุณสมบัติทั่วไปของเซนเซอร์วัดระยะทาง GP2Y0A21 (1)	45
ก.2 คุณสมบัติทั่วไปของเซนเซอร์วัดระยะทาง GP2Y0A21 (2)	45
ก.3 คุณสมบัติทั่วไปของเซนเซอร์วัดระยะทาง GP2Y0A21 (3)	45
ก.4 บล็อกไดอะแกรมของเซนเซอร์วัดระยะทาง GP2Y0A21	45
ก.5 โครงสร้างของเซนเซอร์วัดระยะทาง GP2Y0A21	46
ข.1 คุณสมบัติของบอร์ด Arduino nano 33 IoT (1)	47
ข.2 คุณสมบัติทั่วไปของบอร์ด Arduino nano 33 IoT (2)	47
ข.3 คุณสมบัติทั่วไปของบอร์ด Arduino nano 33 IoT (3)	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของระบบควบคุม	12
2.2 พารามิเตอร์การปรับ Ziegler-Nichols Closed loop	14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and ^{IX} cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่สนใจเกี่ยวกับการลดต้นทุนของการใช้ห้องปฏิบัติการ เนื่องจาก ห้องปฏิบัติการแบบลงมือปฏิบัติจริงมีต้นทุนที่สูง มีความต้องการพื้นที่ในการปฏิบัติงาน อุปกรณ์และพนักงานซ่อมบำรุง อีกทั้งในปัจจุบันยังมีสถานการณ์ของโรคระบาดโควิด 19 (COVID-19) ที่แพร่ระบาดอย่างหนักทำให้การศึกษาเรียนรู้ในห้องปฏิบัติการเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงมีการมองหาการลดต้นทุนของห้องปฏิบัติการโดยใช้ประโยชน์จากอินเทอร์เน็ต เช่น การแทนที่ห้องปฏิบัติการจริงด้วยห้องปฏิบัติการออนไลน์ ปัจจุบันอินเทอร์เน็ตเข้ามามีบทบาทสำคัญและความเป็นอยู่ในชีวิตประจำวันของผู้คนมากขึ้น คณะผู้จัดทำจึงให้ความสนใจในเรื่องการประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตโดยนำเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) มาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาและต่อยอดกับระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย นำไปประยุกต์ใช้กับห้องปฏิบัติการออนไลน์เพื่อการศึกษา เพื่อให้เกิดประโยชน์และอำนวยความสะดวกมากที่สุด

ระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายเป็นกระบวนการที่วัดถูกยกขึ้นโดยไม่พึ่งกลไกทางกล ระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายที่นำเสนอในโครงการนี้จึงมีการออกแบบที่เรียบง่ายเนื่องจากในแง่ของการใช้ต้นทุนที่ต่ำ และง่ายต่อการเรียนรู้ รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้ทางการศึกษา ซึ่งชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมนี้มีความสามารถเพียงพอที่จะทำงานเป็นห้องปฏิบัติการระยะไกลหรือห้องปฏิบัติการออนไลน์ เพียงแค่เชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายไร้สาย (WiFi) รวมถึงสามารถแสดงผลและควบคุมผ่านระบบแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนหรือแท็บเล็ตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. ออกแบบและสร้างระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอล
2. ควบคุมระบบและแสดงผลผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ประยุกต์ใช้รูปแบบการทำงานของเซนเซอร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง
2. ประยุกต์ใช้ Internet of thing (IoT) ของการเชื่อมต่ออุปกรณ์ด้วย IP Network และ

โปรแกรมที่นำมาใช้ประมวลผลกับระบบควบคุม

3. ออกแบบและพัฒนาการทำงานของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายที่

สามารถเลือกใช้งานฟังก์ชันต่างๆ บนสมาร์ตโฟนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม กรุณาแจ้งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4. ออกแบบโปรแกรมที่นำมาใช้แสดงผล

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาหลักการของเซนเซอร์ที่จะนำมาใช้
3. ออกแบบและวางแผนการสร้างชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอล
4. สั่งซื้อเซนเซอร์และอุปกรณ์ต่างๆ
5. ทดสอบเซนเซอร์ที่นำมาใช้
6. เขียนโปรแกรมควบคุมการเปิด-ปิดพัลลัม
7. เขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ และทำการ Normalization
8. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบควบคุม โดยใช้การควบคุมแบบพีไอดี
9. เขียนโปรแกรมการส่งค่าจากเซนเซอร์ไปแสดงผลบนโทรศัพท์มือถือผ่านเครือข่าย Wi-Fi บนแอปพลิเคชัน Blynk
8. ออกแบบส่วน GUI (Graphical user interface) ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk สำหรับการแสดงผล
9. สร้างชุดอุปกรณ์ตามแบบที่วางแผนไว้
10. ทดสอบชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลกับแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านเครือข่ายไร้สาย WiFi
11. สรุปผลและจัดทำเอกสารรายงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลโดยให้มีการควบคุมและแสดงผลบนโทรศัพท์มือถือผ่านเครือข่าย Wi-Fi
2. สามารถนำชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายไปประยุกต์ใช้งานเพิ่มเติม เช่น การนำชุดควบคุมไปใช้สำหรับห้องปฏิบัติการระยะไกลหรือห้องปฏิบัติการออนไลน์

1.6 รายละเอียดของปฏิญานินพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในปฏิญานินพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท และ 4 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงที่มาของปฏิญานินพนธ์ วัตถุประสงค์ของการทำปฏิญานินพนธ์ ขอบเขตของโครงการ ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและรายละเอียดของปฏิญานินพนธ์

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2 ทฤษฎี หลักการ อุปกรณ์ และความรู้ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ เป็นการเพิ่มเติมความรู้ทฤษฎีและความเข้าใจในอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนจะเริ่มการทำโครงงาน

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน เป็นการอธิบายขั้นตอนการทำงานโดยละเอียดทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน เป็นการแสดงผลการทำงานของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย

บทที่ 5 ผลสรุปและข้อเสนอแนะ เป็นบทสรุปภาพรวมของชิ้นงานรวมถึงสิ่งที่จะพัฒนาต่อไปในอนาคต

ภาคผนวก ก เซนเซอร์ GP2Y0A21 Sharp Infrared Sensor 10-80 cm

ภาคผนวก ข บอร์ด Arduino nano 33 IoT

ภาคผนวก ค โปรแกรมควบคุมการทำงานและการแสดงผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานลมและอากาศพลศาสตร์

อากาศพลศาสตร์ เป็นพลศาสตร์สาขาหนึ่งซึ่งว่าด้วยการเคลื่อนที่ของอากาศและแก๊สอื่น ๆ หรือที่เกี่ยวข้องกับแรงต่างๆ ที่กระทำต่อวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ผ่านไป ในอากาศ เรื่องของพลังงานลม และหลักการของอากาศพลศาสตร์นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรง และเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต้องเรียนรู้ หลักการต่างๆ ของอากาศพลศาสตร์

แรงต้านอากาศ

แรงต้านอากาศเป็นแรงที่มีทิศทางต่อต้านการเคลื่อนที่หรือทิศทางตรงข้ามกับแรงที่พยายามจะทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านกระแสอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมีผลจากรูปร่างของวัตถุ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ทิศทางของแรงต้านอากาศ

2.2 กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน

กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันเป็นกฎทางกายภาพสามข้อที่เป็นรากฐานของกลศาสตร์ดั้งเดิม ใช้สำหรับการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุกับแรงที่กระทำต่อวัตถุนั้น และการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเหล่านั้น

กฎการเคลื่อนที่ข้อ 1 ของนิวตัน

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่หนึ่งของนิวตันหรือ กฎของความเฉื่อย กล่าวว่า “วัตถุจะรักษาสถานะอยู่นิ่ง หรือสถานะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอในแนวเส้นตรง นอกจากมีแรงลัพธ์มากระทำ” ขยายความได้ว่า ถ้าวัตถุนั้นนิ่งอยู่ไม่เคลื่อนไหวก็ยังคงอยู่นิ่งอยู่อย่างนั้น แต่ถ้าวัตถุนั้นกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

($a = 0$) ก็ยังคงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ต่อไปตราบใดที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ นิวตันบรรยายกฎข้อที่หนึ่งว่า “วัตถุจะรักษาสภาพหยุดนิ่ง หรือสภาวะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอในแนวเส้นตรง นอกจากมีแรงลัพธ์มากระทำ” เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\Sigma F = 0 \quad (1)$$

เมื่อ ΣF คือ ผลรวมของแรงหรือแรงลัพธ์

กฎการเคลื่อนที่ข้อ 2 ของนิวตัน

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันเรียกว่า กฎความเร่ง กฎข้อนี้กล่าวว่า “ความเร่งของอนุภาคเป็นปฏิภาคโดยตรงกับแรงลัพธ์ที่กระทำต่ออนุภาค โดยมีทิศทางเดียวกัน และเป็นปฏิภาคผกผันกับมวลของอนุภาค” ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน เนื่องจากความเร่งเป็นสัดส่วนตรงกับแรง ดังนั้นอัตราส่วนของแรงกับความเร่งจะเป็นค่าคงที่ ซึ่งตรงกับมวล m ของวัตถุ เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\Sigma F = ma \quad (2)$$

เมื่อ ΣF คือ ผลรวมของแรงหรือแรงลัพธ์

m คือ มวลของวัตถุ

a คือ ความเร่งของวัตถุ

นิวตันวางกฎการเคลื่อนที่ข้อแรกเพื่อกำหนดกรอบอ้างอิงสำหรับให้กฎอื่นๆ สามารถใช้ได้ กฎของการเคลื่อนที่ข้อแรกตั้งเงื่อนไขของกรอบอ้างอิงอย่างน้อยหนึ่งกรอบที่เรียกว่า กรอบอ้างอิงเฉื่อยหรือกรอบอ้างอิงนิวโตเนียน ซึ่งเมื่อเทียบกับกรอบนี้แล้ว การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับแรงเป็นเส้นตรงและมีความเร็วคงที่ กฎการเคลื่อนที่ข้อแรกของนิวตันมักถูกเรียกว่ากฎของความเฉื่อย ดังนั้นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการเคลื่อนที่สม่ำเสมอของอนุภาคเมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิงเฉื่อยคือแรงสุทธิรวมที่กระทำเป็นศูนย์ ซึ่งกฎข้อที่หนึ่งและสองของนิวตันจะใช้ได้เฉพาะในกรอบอ้างอิงเฉื่อย

กฎการเคลื่อนที่ข้อ 3 ของนิวตัน

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 3 ของนิวตันกล่าวว่า “ทุกแรงกิริยาย่อมมีแรงปฏิกิริยาซึ่งมีขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงข้ามกันเสมอ กฎข้อนี้เรียกว่า กฎของกิริยาและปฏิกิริยา (Law of action and reaction) แรงกิริยาและแรงปฏิกิริยาหมายถึง แรงกระทำและแรงกระทำตอบ โดยเป็นแรงซึ่งกระทำ

ต่อมวลที่ต่างกัน และเกิดขึ้นพร้อมกันเป็นคู่เสมอ โดยที่มวลอาจไม่สัมผัสกัน และถือว่าแรงหนึ่งแรงใด เป็นแรงกิริยาและแรงปฏิกิริยาก็ได้ เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$F_{12} = F_{21} \quad (3)$$

เมื่อ F_{12} คือ แรงกิริยาที่วัตถุชิ้นที่ 1 กระทำต่อวัตถุชิ้นที่ 2

F_{21} คือ แรงกิริยาที่วัตถุชิ้นที่ 2 กระทำต่อวัตถุชิ้นที่ 1

2.3 แรงโน้มถ่วงของโลก

จากกฎความโน้มถ่วงของนิวตัน ความโน้มถ่วงของโลกที่กระทำกับมวลใดๆ จะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างศูนย์กลางมวลของโลกกับศูนย์กลางมวลวัตถุยกกำลังสอง ดังนั้นแรงโน้มถ่วงของโลก บริเวณต่าง ๆ จึงมีค่าไม่เท่ากัน และเนื่องจากโลกมีการหมุนรอบตัวเองมีผลทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง แรงหนีศูนย์กลางนี้จะหักล้างกับแรงโน้มถ่วงของโลก แรงหนีศูนย์กลางจะมีค่ามากที่สุดบริเวณเส้นศูนย์สูตร และมีค่าน้อยที่สุดบริเวณขั้วโลก ผลของแรงหนีศูนย์กลางนี้ทำให้แรงโน้มถ่วงของโลกบริเวณเส้นศูนย์สูตรมีค่าน้อยกว่าแรงโน้มถ่วงของโลกบริเวณขั้วโลกเหนือ นอกจากนั้น โลกก็มีได้เป็นทรงกลมโดยสมบูรณ์ แต่แบนตรงกลางเล็กน้อยคล้ายผลส้ม ทำให้ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของโลกถึงพื้นผิวโลกแปรผันไปตามละติจูด

สำหรับการคำนวณทางวิศวกรรมโดยทั่วไปความเปลี่ยนแปลงของค่าแรงโน้มถ่วงไม่ถึงเป็นนัยสำคัญ จึงสามารถใช้ค่าเฉลี่ยของแรงโน้มถ่วงของโลกได้ โดยกำหนดให้ ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (g) มีค่าเท่ากับประมาณ $9.81(\sim 10)$ เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

2.4 พลศาสตร์ของไหล

พลศาสตร์ของของไหลเป็นการศึกษาของไหลที่มีการเคลื่อนที่ โดยสมมติให้ของไหลเป็นของไหลอุดมคติ พฤติกรรมของของไหลอุดมคติอธิบายได้ด้วย สมการความต่อเนื่อง (The equation of continuity) สมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's equation) และ หลักของแบร์นูลลี (Bernoulli's principle) ความรู้เกี่ยวกับหลักการของแบร์นูลลีนำไปใช้อธิบายการทำงานของอุปกรณ์บางอย่าง เช่น เครื่องพ่นสี การทำงานของปีกเครื่องบิน เป็นต้น รวมทั้งใช้อธิบายปรากฏการณ์บางอย่างในชีวิตประจำวัน

2.4.1 ของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สสารในสภาพปกติมีสามสถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และ แก๊ส ที่อุณหภูมิหนึ่งของแข็งมีไม่ว่ากรณีใดรูปปร่างและปริมาตรคงตัว ถ้าถูกแรงไม่มากอัดจะส่วนของเหลวจะมีปริมาตรคงตัวและมีรูปทรงตามไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

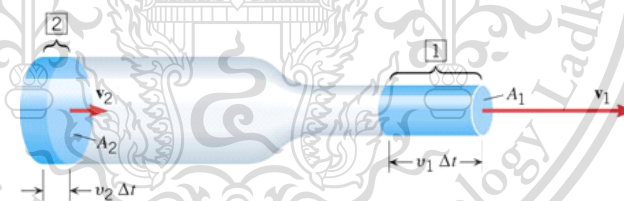
ภาชนะที่บรรจุและปริมาตรจะลดลงเล็กน้อยเมื่อถูกแรงอัด ส่วนแก๊สมีรูปร่างและปริมาตรไม่คงตัว ปริมาตรของแก๊สขึ้นอยู่กับปริมาตรภาชนะที่บรรจุ แก๊สมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากกว่าของเหลวมาก แม้อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่เนื่องจากของเหลวและแก๊สมีรูปร่างไม่แน่นอน อีกทั้งสามารถไหลจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ จึงอาจเรียกของเหลวและแก๊สว่า ของไหล (Fluid)

2.4.2 คุณสมบัติของของไหลในอุดมคติ

1. มีการไหลอย่างสม่ำเสมอ (Steady flow) หมายถึง ความเร็วของทุกอนุภาค ณ ตำแหน่งบนพื้นที่หน้าตัดเดียวกันในของไหลมีค่าคงตัว
2. เป็นการไหลโดยไม่หมุน (Irrotational flow) คือ ในบริเวณโดยรอบจุดหนึ่งๆ ในของไหล จะไม่มีอนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเชิงมุมรอบจุดนั้นๆ เลย
3. เป็นการไหลที่ไม่มีแรงต้านเนื่องจากความหนืด (Nonviscous flow) ไม่มีแรงต้านใดๆ ภายในเนื้อของไหลมากระทำต่ออนุภาคของไหล
4. ไม่สามารถอัดได้ (Incompressible flow) ในทุกๆ ส่วนของของไหลมีความหนาแน่นคงตัว

2.4.3 สมการความต่อเนื่อง

เป็นสมการที่ใช้ศึกษาการไหลของของไหลภายในท่อ การไหลของของไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอไหลจากปลาย 2 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_2 ไปยังปลาย 1 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_1 แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การไหลของของไหลภายในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ

เนื่องจากของไหลไม่สามารถไหลผ่านผนังท่อและไม่มีการสร้างหรือทำลายของไหลในท่อ ดังนั้นมวลของของไหลที่ผ่านแต่ละส่วนของท่อการไหลในเวลาเดียวกันจึงมีค่าเท่ากัน เนื่องจากของไหลอุดมคติไม่สามารถอัดได้ ดังนั้น ความหนาแน่นจึงคงตัว แสดงว่า จะได้ $\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2$ สมการดังกล่าวเรียกว่า สมการความต่อเนื่อง (The equation of continuity) สรุปใจความได้ว่า ผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับอัตราเร็วของของไหลอุดมคติ ไม่ว่าจะอยู่ที่ตำแหน่งใดในท่อ การไหลจะมีค่าคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.4 สมการของแบร์นูลลี

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (4)$$

เมื่อ P_1, P_2 คือ ความดันของของไหล

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

h_1, h_2 คือ ความสูงของท่อสายกระแสจากระดับอ้างอิง

v_1, v_2 คือ ความเร็วของไหล

A_1, A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อสายกระแส

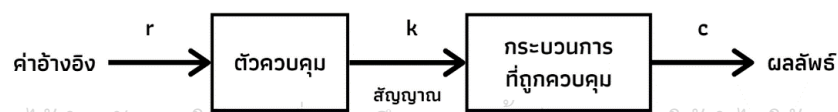
สมการดังกล่าวเรียกว่า สมการแบร์นูลลี (Bernoulli's equation) สรุปใจความได้ว่า ผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ภายในท่อที่มีของไหลผ่าน มีค่าคงตัวเสมอ

จากสมการของแบร์นูลลี ถ้าระดับคงตัวเมื่อของไหลมีอัตราเร็วเพิ่ม ความดันของของไหลจะลด และเมื่อของไหลมีอัตราเร็วลดลง ความดันของของไหลจะเพิ่มขึ้น ข้อสรุปนี้เรียกว่า หลักของแบร์นูลลี (Bernoulli's principle)

2.5 ระบบควบคุม

2.5.1 พื้นฐานของระบบควบคุมแบบวงเปิดและวงปิด

ระบบควบคุมพื้นฐานสามารถที่จะแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อค่าอ้างอิง r ถูกกำหนดขึ้น ตัวควบคุมจะส่งสัญญาณ k ไปยังกระบวนการ (Process) ที่ถูกควบคุมและให้ผลลัพธ์ c ตามที่ต้องการ ถ้าค่าอ้างอิง r คงที่ ผลลัพธ์ c จะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ผลลัพธ์ c จะเบี่ยงเบนได้เมื่อถูกกระทบจากปัจจัยภายนอก ระบบควบคุมแบบนี้จะเรียกว่า ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop control system) การปรับค่าผลลัพธ์ c ที่เบี่ยงเบนไปให้กลับสู่ค่าที่ต้องการจะต้องใช้การปรับด้วยมือเท่านั้น ดังนั้นระบบควบคุมแบบวงเปิดจึงเหมาะที่จะใช้ในงานที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงและแม่นยำมากนัก เช่น ระบบตั้งเวลาในเครื่องซักผ้า ระบบควบคุมความร้อนในเตาอบไมโครเวฟ ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ในพัดลม เป็นต้น

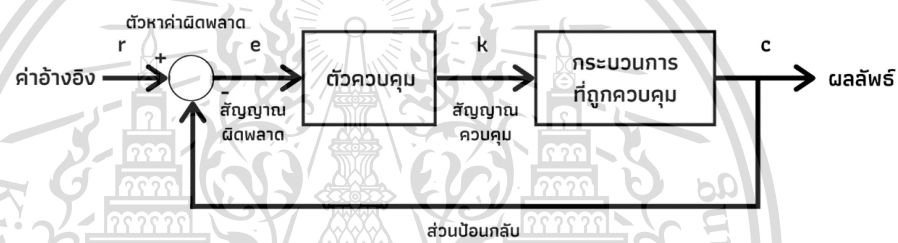


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 2.3 นี้ลอกไปใช้ซ้ำของระบบควบคุมแบบพื้นฐาน ครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในระบบควบคุมที่มีการนำเอาผลลัพธ์ที่ได้ป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อปรับปรุงสัญญาณควบคุมให้มีค่าที่เหมาะสมที่จะกระตุ้นให้กระบวนการที่ถูกควบคุมให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องอยู่ตลอดเวลาจะเรียกระบบนี้ว่า ระบบควบคุมป้อนกลับ (Feedback control system) หรือระบบควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop control system) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่ตัวตรวจหาค่าผิดพลาด (Error detector) จะทำการเปรียบเทียบหาสัญญาณค่าผิดพลาด e ที่เกิดจากผลต่างของค่าอ้างอิง r และผลลัพธ์ c สัญญาณผิดพลาด e จะถูกส่งไปยังตัวควบคุม (Controller) เพื่อสร้างสัญญาณควบคุม (ไปกระตุ้นกระบวนการที่ถูกควบคุมและให้ผลลัพธ์จุดออก c ตาม ที่คาดหวังไว้ จากการทำงานของระบบควบคุมป้อนกลับนี้ ถ้าผลลัพธ์ c มีการเบี่ยงเบนไปจากผลกระทบที่มาจากปัจจัยภายนอก เช่น ผลของอุณหภูมิที่แปรเปลี่ยนไป เป็นต้น ส่งผลให้ผลลัพธ์ c ถูกปรับปรุงแก้ไขให้กลับมายังค่าที่ต้องการตามเดิมได้ด้วยวงจรการทำงานจากระบบควบคุมเอง โดยไม่ต้องทำการปรับด้วยมือ ดังเช่นระบบควบคุมแบบวงเปิด



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับ

2.5.2 ระบบควบคุมพีไอดี

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของพีไอดีที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบวิธีคำนวณของพีไอดี ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน ปริพันธ์ และ อนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งพ่วงผ่านพ้นไป และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด การรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการ โดยการปรับค่าคงที่ในพีไอดี ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความ

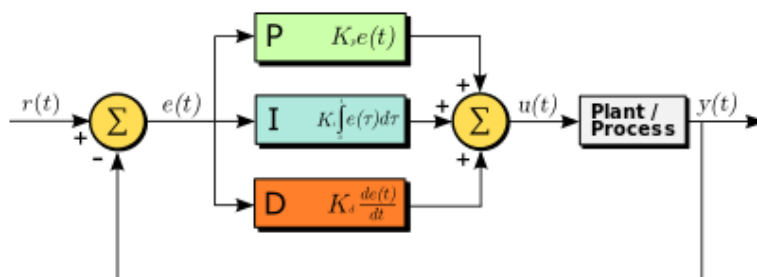
ผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) และวิธีพีไอดี นี้ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ตามการค้า
รับประกันได้ว่า จะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรที่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แน่นอน การประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ
 พีไอดีบางครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใดบ้าง



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบพีไอดี

เทอมของสัดส่วน (บางครั้งเรียก อัตราขยาย) จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน เทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ

$$P_{out} = K_p e(t) \tag{5}$$

- เมื่อ P_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน
- K_p คือ อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้
- e คือ ค่าความผิดพลาด ($SP - PV$)
- t คือ เวลา

เทอมปริพันธ์ (บางครั้งเรียก รีเซต) เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์ เทอมปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการ

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \tag{6}$$

- เมื่อ I_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์
- K_i คือ อัตราขยายปริพันธ์, ตัวปรับค่าได้
- e คือ ความผิดพลาด ($SP - PV$)
- t คือ เวลา
- τ คือ ตัวแปรปริพันธ์หุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุกๆเวลา (นั่นคือ เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ ขนาดของผลของเทอมอนุพันธ์ (บางครั้งเรียก อัตรา) ขึ้นกับ อัตราขยายอนุพันธ์

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (7)$$

เมื่อ D_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์
 K_d คือ อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้
 e คือ ความผิดพลาด ($SP - PV$)
 t คือ เวลา

เทอมสัดส่วน, ปริพันธ์, และอนุพันธ์ จะนำมารวมกันเป็นสัญญาณขาออกของการควบคุมแบบ PID กำหนดให้ $u(t)$ เป็นสัญญาณขาออก สมการสุดท้ายของวิธี PID คือ

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (8)$$

2.5.3 คุณสมบัติของระบบควบคุมแบบพีไอดี

ระบบควบคุมโดยทั่วไป สามารถแบ่งคุณสมบัติของระบบได้เป็น 4 แบบ สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

1. ระบบควบคุมแบบ P (P controller) จะมีคุณสมบัติ
 - ลดค่า Rise time (t_r) ทำให้ระบบทำงานเร็วขึ้นในช่วงแรก
 - เพิ่ม Overshoot (M_p) ทำให้ระบบแกว่งในช่วงเริ่มต้น แต่ส่งผลให้ค่า Steady state error ลดลง
2. ระบบควบคุมแบบ PD (PD controller) จะมีคุณสมบัติ
 - ลด Overshoot (M_p) ทำให้ระบบมีการแกว่งน้อยลงในช่วงเริ่มต้น
 - ลด Setting time (t_s) ทำให้ระบบทำงานถึงจุดคงที่ (Steady state) เร็วขึ้น
3. ระบบควบคุมแบบ PI (PI controller) จะมีคุณสมบัติ
 - ลดค่า Rise time (t_r) ทำให้ระบบทำงานเร็วขึ้นในช่วงแรก
 - กำจัดค่า Steady state error (e_{ss}) เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตเทียบเท่ากับค่าอินพุต
4. ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) เป็นการนำคุณสมบัติของระบบควบคุมทั้ง 3 แบบ คือ P, PD และ PI มารวมกัน โดยสามารถกำหนดค่าเกณฑ์ทั้ง 3 แบบ คือ P, I และ D ได้อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้ในการค้า
 อีสารนี้เป็นการนำเนื้อหาไปใช้ในการค้า โดยทำการปรับค่าเกณฑ์ทั้ง 3 การค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แบบ และนำมาพิจารณาผลตอบสนองที่ได้ เมื่อปรับค่าเกนจนได้ผลตอบสนองตามต้องการแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปติดตั้งหรือออกแบบเป็นวงจรใช้งานต่อไป

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของระบบควบคุม

ระบบควบคุม	Rise Time (tr)	Maximum Overshoot (Mp)	Setting Time (ts)	Steady State Error (ess)
แบบ P	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลงน้อย	ลด
แบบ I	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	กำจัด
แบบ D	เปลี่ยนแปลงน้อย	ลด	ลด	เปลี่ยนแปลงน้อย

2.5.4 การปรับจูนค่าคงที่ของตัวควบคุม

การปรับจูนค่าคงที่ของตัวควบคุม เป็นการปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับที่กระบวนการและระบบที่ใช้งาน จะเกิดการตอบสนองของระบบต่อตัวควบคุม ค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) ซึ่งสมการพีไอดี ที่ใช้จะมีค่าคงที่อยู่ที่ 3 ตัวคือ K_p , K_i และ K_d ที่ต้องกำหนดค่าเข้าไป การเลือกค่าที่เหมาะสมจะทำให้ระบบสมดุลและได้ผลลัพธ์ตรงตามต้องการมากที่สุด ซึ่งก็คือการจูนพีไอดี ส่วนวิธีการจูนพีไอดี สามารถแบ่งได้สองแบบใหญ่ๆ คือ Close-loop tuning และ Open-loop tuning โดยจะขอกล่าวถึงในส่วนของ Close-loop tuning เท่านั้น

Trial & error close-loop tuning

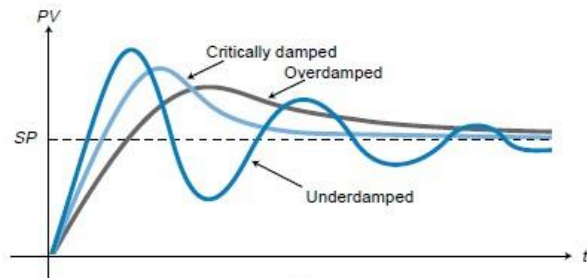
วิธีนี้คือการทดลองป้อน K_p , K_i เข้าระบบ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระบบ และหาค่าที่ทำให้ระบบสมดุลมากที่สุด โดยมีขั้นตอนการปรับจูน ดังนี้

1. เริ่มพล็อตกราฟของ Process variable (PV)
2. ปรับให้ K_i และ K_d เป็นศูนย์
3. เริ่มปรับค่า K_p ค่าน้อยๆ
4. เปลี่ยน PID Controller ให้อยู่ในโหมด Auto
5. ทดสอบระบบโดยเปลี่ยนค่า Set point แล้วสังเกต Damping ของระบบ ปรับค่า K_p เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนระบบมี Damping ตามต้องการ หรือ ให้เป็น Quarter-amplitude ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7

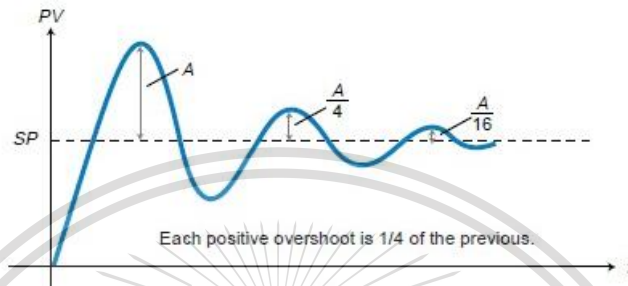
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.6 กราฟผลการตอบสนองของ PV (Process Value)

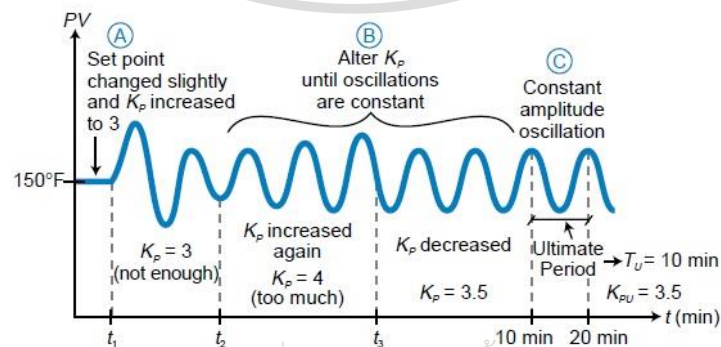


รูปที่ 2.7 กราฟของ Quarter-amplitude

6. ถ้าระบบยังมี Offset ระหว่าง Set point และ Process variable ให้ปรับค่า K_i จนระบบไม่มี Offset
7. ถ้าระบบมีการเกิด Overshoot และ Undershoot ให้ปรับค่า K_d จนกราฟของระบบนิ่งและเป็นเส้นตรงมากขึ้น

Ziegler-Nichols Close-loop tuning

หลักของวิธีนี้คือหาค่า Gain ที่ทำให้ระบบเกิด Oscillation แบบแอมพลิจูดคงที่ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเรียกว่า Ultimate proportional gain (K_{pu}) และคาบการสั่น ซึ่งเรียกว่า Ultimate period (T_u) จากนั้นนำทั้งสองค่านี้ไปคำนวณหา K_p , K_i และ K_d ตามตารางที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น **รูปที่ 2.8** การปรับจูนระบบโดยใช้วิธี Ziegler-Nichols Close-Loop tuning

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์การปรับ Ziegler-Nichols Closed loop

ชนิดของตัวควบคุม	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{K_{pu}}{2}$	∞	0
PI	$\frac{K_{pu}}{2.2}$	$\frac{T_u}{1.2}$	0
PID	$\frac{K_{pu}}{1.7}$	$\frac{T_u}{2}$	$\frac{T_u}{8}$

โดยมีขั้นตอนการจูนดังนี้

1. เริ่มพล็อตกราฟของ Process variable (PV)
2. เซ็ต K_i และ K_d เป็นศูนย์
3. เซ็ต PID Controller ให้อยู่ในโหมด Auto
4. ปรับค่า K_p เริ่มจากค่าน้อยๆ
5. จดค่า K_p และคาบเวลาที่ทำให้เกิด Oscillation แบบแอมป์ริจูดคงที่
6. คำนวณค่า K_p, K_i และ K_d จากตาราง

2.6 ทฤษฎีการออกแบบแบบจำลองของระบบควบคุมการลอยตัว

การลอยตัวของวัตถุในอากาศหรือการเป่าลมกับให้วัตถุ เป็นการยกวัตถุให้ลอยตัวขึ้นไปอยู่ในตำแหน่งได้อย่างมั่นคงโดยไม่พึ่งกลไกทางกล ซึ่งจะมีแรงลมที่ยกวัตถุขึ้นต้านกับแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อลูกบอล ซึ่งสามารถจำลองสมการของระบบควบคุมการลอยตัวได้ดังนี้

$$m\Delta\ddot{z} = F = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot (v_w - \dot{z})^2 - m \cdot g \quad (9)$$

โดยที่ m คือ มวลของลูกปิงปอง

z คือ ระยะของวัตถุในแนวตั้งขณะลอยอยู่ในท่ออะคริลิก

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

A คือ พื้นที่ของวัตถุที่สัมผัสกับการไหลของอากาศที่สูงขึ้น

v_w คือ ความเร็วของอากาศภายในท่ออะคริลิก

g คือ แรงโน้มถ่วง (9.807 m/s^2)

C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงดูดของอากาศหรือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ตรงตามการนำไปใช้
 number ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุที่เคลื่อนที่และความเร็วของการไหล สำหรับ
 This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความเร็วเพียงเล็กน้อยของแรงลม จึงสามารถสันนิษฐานได้ว่าค่า C_d คงที่ ในกรณีนี้จะได้สมการ (9) ที่ $\alpha = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A$

$$\ddot{z} = \frac{\alpha}{m} \cdot (v_w - \dot{z})^2 - g \quad (10)$$

วัตถุที่ลอยอยู่จะอยู่ในสภาพคงที่เมื่อไม่เคลื่อนที่หรือหยุดนิ่ง นั่นคือเมื่อ $\dot{z} = \ddot{z} = 0$ และให้ความเร็วอากาศที่จุดสมดุล คือ v_{eq} จะได้

$$g = \frac{\alpha}{m} \cdot v_{eq}^2 \quad (11)$$

ดังนั้นจะได้สมการการเคลื่อนที่เท่ากับ

$$\ddot{z} = g \cdot \left(\left(\frac{v_w - \dot{z}}{v_{eq}} \right)^2 - 1 \right) \quad (12)$$

กำหนดให้ $x = \frac{v_w - \dot{z}}{v_{eq}}$ แล้วแทนในสมการ (4) จะได้ $f = g \cdot (x^2 - 1)$ และสามารถทำให้เป็นเส้นตรงรอบๆ จุดสมดุลได้อย่างง่ายดาย ($v_{eq} = v_w - \dot{z}$, หรือ $x = 1$) โดยการใช้การประมาณของ Taylor's ($f(x) \approx f(1) + f'(1) \cdot (x - 1)$)

$$\ddot{z} = 2 \cdot g \cdot (x - 1) = \frac{2 \cdot g}{v_{eq}} \cdot (v_w - \dot{z} - v_{eq}) \quad (13)$$

สมมติว่าระบบอธิบายได้ด้วยโมเดลเชิงเส้น และมีฟังก์ชันการถ่ายโอนกระบวนการ คือ

$$\frac{\Delta z(s)}{\Delta v(s)} = \frac{1}{s} \frac{a}{s+a} \quad (14)$$

โดยที่ $a = 2g/v_{eq}$ และ $(\Delta z, \Delta v)$ คือ การเพิ่มขึ้นของตำแหน่งและความเร็วลมตามลำดับ ที่ตำแหน่งใกล้จุดสมดุล เมื่อพิจารณาที่พัดลม สามารถจำลองเป็นกระบวนการอันดับหนึ่ง จะได้ฟังก์ชันการถ่ายโอนระหว่าง แรงดันไฟฟ้าขาเข้าและความเร็วลม จะได้เป็น

$$\frac{v(s)}{u(s)} = \frac{k_v}{\tau s + 1} \quad (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยที่ k_v คือ อัตราขยายที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าขาเข้ากับความเร็วมอเตอร์ที่สภาวะคงที่และ τ คือค่าคงที่เวลาของพัดลม จะได้ฟังก์ชันการถ่ายโอนของกระบวนการทั้งหมดสามารถระบุได้ดังนี้

$$z(s) = \frac{1}{s} \frac{ak_v}{(s+a)(\tau s+1)} \quad (16)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนของการดำเนินงานได้วางแผนไว้ดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาหลักการของเซนเซอร์ที่จะนำมาใช้
3. ออกแบบและวางแผนการสร้างชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอล
4. สั่งซื้อเซนเซอร์และอุปกรณ์ต่างๆ
5. ทดสอบเซนเซอร์ที่นำมาใช้
6. เขียนโปรแกรมควบคุมการเปิด-ปิดพัลลัม
7. เขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ และทำการ Normalization
8. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบควบคุม โดยใช้การควบคุมแบบพีไอดี
9. เขียนโปรแกรมการส่งค่าจากเซนเซอร์ไปแสดงผลบนโทรศัพท์มือถือผ่านเครือข่าย Wi-Fi บนแอปพลิเคชัน Blynk
8. ออกแบบส่วน GUI (Graphical user interface) ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk สำหรับการแสดงผล
9. สร้างชุดอุปกรณ์ตามแบบที่วางแผนไว้
10. ทดสอบชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลกับแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านเครือข่ายไร้สาย WiFi
11. สรุปผลและจัดทำเอกสารรายงานการวิจัย

3.2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 บอร์ด Arduino nano 33 IoT

บอร์ด Arduino Nano 33 IoT มีขนาดเล็ก และมีการเชื่อมต่อ WiFi และบลูทูธที่รวมเข้า กับสถาปัตยกรรมพลังงานต่ำ ทำให้เป็นโซลูชันที่ใช้งานได้จริงและคุ้มค่า Arduino Nano 33 IoT ทำงานเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์กับ Arduino IoT Cloud และมีชิป ATECC608A สำหรับการเข้ารหัส มาบนบอร์ด ซึ่งให้ความปลอดภัยระดับสูง การรวมเข้ากับ Arduino IoT Cloud ยังเป็นวิธีที่มี ประสิทธิภาพมาก Arduino Nano 33 IoT ใช้ชิป SAMD21G18A ที่เป็น Cortex-M0+ เป็นชิปหลัก พร้อมโมดูล UBLOX NINA W102 ที่ภายในเป็น ESP32 สำหรับการเชื่อมต่อ Wi-Fi ในบอร์ดยังมีชุด เซนเซอร์ Inertial Measurement Unit (IMU) ในตัวด้วย มีเซนเซอร์เคลื่อนไหว 9 แกนในตัว รองรับ แรงดัน 3.3V เท่านั้น ซึ่งถือว่าเป็นบอร์ดที่คุ้มค่าต่อการลงทุนนำมาใช้ในงานมาก

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.1 บอร์ด Arduino nano 33 IoT

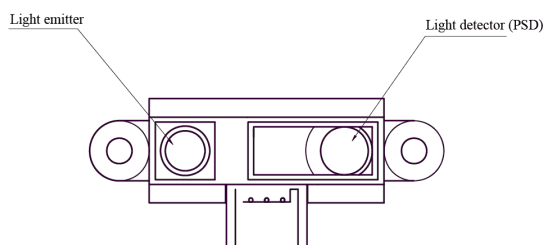
3.2.2 เซนเซอร์ GP2Y0A21 Sharp Infrared Sensor 10-80 cm

เซนเซอร์สำหรับ Arduino ใช้สำหรับการวัดระยะทางแบบ อินฟราเรด รุ่น Sharp GP2Y0A21 สามารถวัดระยะทางได้ 10-80 cm แบบแอนะล็อก หลักการทำงานของเซนเซอร์ จะส่งลำแสงไปตกกระทบต่อวัตถุจากนั้นสะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ แล้ววัดเวลาในสะท้อนกลับ



รูปที่ 3.2 GP2Y0A21 Sharp Infrared Sensor 10-80 cm

Sharp Infrared Sensor จะใช้ลำแสงอินฟราเรดสะท้อนออกจากวัตถุเพื่อวัดระยะทาง ซึ่งระยะทางจะคำนวณโดยใช้รูปสามเหลี่ยมของลำแสง เซนเซอร์ประกอบด้วย IR LED และตัวตรวจจับแสงหรือ PSD (Position sensing device) เมื่อลำแสงสะท้อนโดยวัตถุ ลำแสงที่สะท้อนจะไปถึงเครื่องตรวจจับแสงและ "จุดแสง" จะก่อตัวขึ้นบน PSD



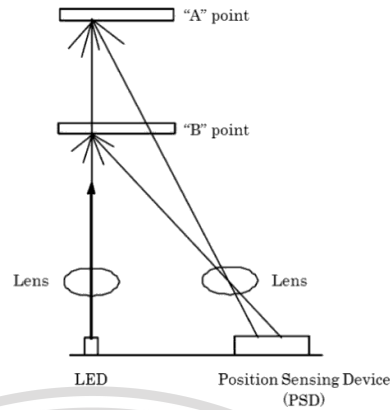
รูปที่ 3.3 จุด Light emitter และ Light detector (PSD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

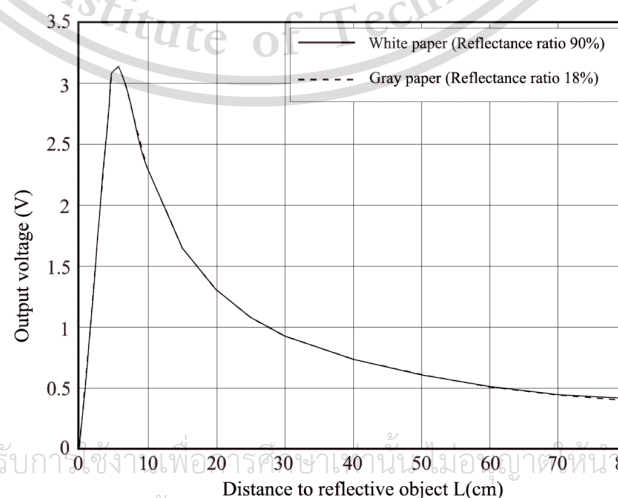
และเมื่อตำแหน่งของวัตถุเปลี่ยนไปมุมของลำแสงสะท้อนและตำแหน่งของจุดบน PSD ก็เปลี่ยนไปเช่นกัน จุด A และจุด B ใน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของวัตถุเปลี่ยนไปและตำแหน่งของจุดบน PSD

Sharp Infrared Sensor มีวงจรประมวลผลสัญญาณในตัว ซึ่งวงจรนี้ประมวลผลตำแหน่งของจุดออปติคัลบน PSD เพื่อกำหนดตำแหน่ง (ระยะทาง) ของวัตถุสะท้อนแสง และส่งสัญญาณแอนะล็อก ซึ่งขึ้นอยู่กัตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ด้านหน้าของเซนเซอร์

Sharp Infrared Sensor จะส่งสัญญาณแอนะล็อกซึ่งจะเปลี่ยนไปตามระยะห่างระหว่างเซนเซอร์และวัตถุ จากกราฟรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าแรงดันขาออกของ Sharp Infrared Sensor อยู่ในช่วง 2.3 V เมื่อวัตถุอยู่ห่าง 10 cm และช่วง 0.4 V เมื่อวัตถุอยู่ห่างออกไป 80 cm กราฟยังแสดงให้เห็นว่าทำไมช่วงการตรวจจับที่ใช้งานได้จึงเริ่มต้นที่ 10 cm สังเกตว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัตถุที่อยู่ห่างออกไป 2 cm จะเหมือนกับแรงดันไฟฟ้าขาออกสำหรับวัตถุที่อยู่ห่างออกไป 28 cm ดังนั้นช่วงการตรวจจับที่ใช้งานได้จึงเริ่มต้นหลังจากจุดสูงสุดที่ประมาณ 10 cm หรือ 2.3 V และกราฟยังแสดงข้อเสียเปรียบของ Sharp Infrared Sensor ที่การตอบสนองไม่เป็นเชิงเส้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า

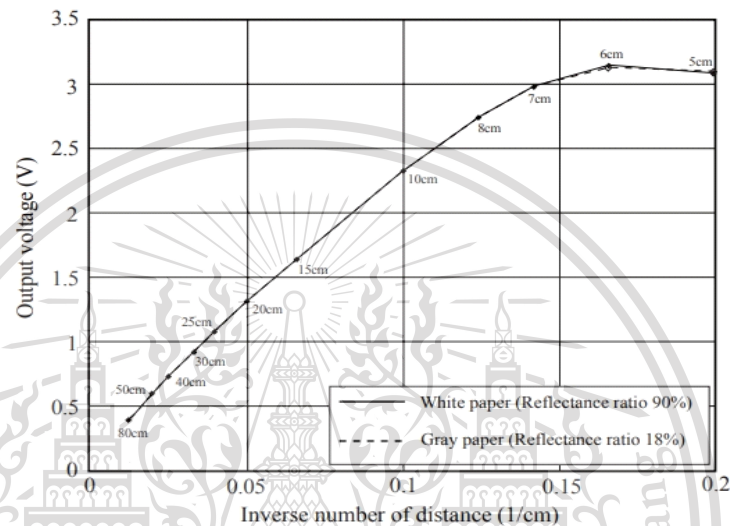
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับแรงดันเอาต์พุต

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เพื่อให้ได้ระยะทางในหน่วยเซนติเมตรจึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบเซนเซอร์ (Sensor calibration) ซึ่งจะทำให้การแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ส่งกลับเป็นเซนติเมตร เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของ Sharp Infrared Sensor ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ส่งกลับจะแปรผกผันกับระยะทางที่รับ ค่าจำนวนเต็มที่อ่านจากขาอินพุตแบบแอนะล็อกเป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าอินพุต เป็นผลให้ค่าจำนวนเต็มที่ส่งกลับโดย `analogRead()` เป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางที่วัดได้ และตัวอย่างผลของการสอบเทียบ จะแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างผลของการสอบเทียบค่า

3.2.3 Switching Power Supply 12V 5A

แหล่งจ่ายไฟแบบ Switching Power Supply แปลงไฟจาก 220VAC เป็น 12VAC จ่ายกระแสสูงสุด 5A



รูปที่ 3.7 Switching Power Supply 12V 5A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.4 DC Fan (4 Wire)

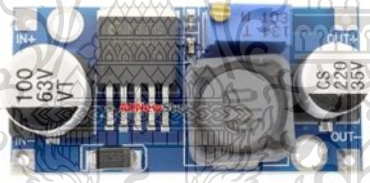
พัดลม DC 4 สาย 12V จ่ายกระแสสูงสุด 0.86A เนื่องจากหากใช้กระแสที่ต่ำกว่า 0.5A จะทำให้แรงลมที่ถูกปล่อยออกมาไม่มากพอต่อการควบคุมการลอยตัวของลูกปิงปอง



รูปที่ 3.8 พัดลม DC 12V 0.86A

3.2.5 LM2596HVS High voltage Step down 5-48V to 1.25-26V

โมดูล LM2596HV แปลงไฟจาก 5-48V ให้เป็น 1.25-26V กระแสสูงสุด 3A จ่ายกระแสต่อเนื่องที่ 1.2A พลังงานรวมแบบต่อเนื่องที่ 20W



รูปที่ 3.9 Step down 5-48V to 1.25-26V

3.3 ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง

3.3.1 Arduino IDE

ใช้สำหรับเขียนโปรแกรมการทำงานต่างๆ ให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 3.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.10 สัญลักษณ์โปรแกรม Arduino IDE
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.2 Visual Studio

Microsoft Visual Studio คือ ชุดพัฒนาโปรแกรม (Integrated development environment) ประกอบด้วยโปรแกรมหลายๆ ตัวที่ใช้ในการสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ หรือใช้สร้างเว็บโปรแกรม สร้างเว็บบริการ จัดการฐานข้อมูล และอื่นๆ อีกมากมาย Visual Studio ได้รวบรวมเครื่องมือพัฒนาต่างๆ ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมตั้งแต่ หน้าจอที่ใช้พัฒนา โปรแกรม (Development interface) เครื่องมือในการตรวจหาจุดผิดในโปรแกรม (Debugging tool) ตัวช่วยอัตโนมัติในการเขียนโปรแกรม (Wizard tool) ตัวจัดการฐานข้อมูล (Database management) และส่วนประกอบอื่นๆ ที่จำเป็นในการพัฒนาโปรแกรม นำมาประกอบกันเป็นชุด เรียกว่า Integrated Development Environment (ชุดพัฒนาโปรแกรม) ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 สัญลักษณ์โปรแกรม Visual Studio

3.3.3 TinkerCAD

โปรแกรม Tinkercad เป็นโปรแกรมออกแบบอีกหนึ่งตัวที่น่าสนใจ และได้รับความนิยมอยู่ ณ ขณะนี้ เป็นโปรแกรมที่ทำงานบน Web Browser โดยข้อดีของโปรแกรม Tinkercad คือ ฟรี แวร์และใช้งานง่ายมาก นอกจากความสามารถในการออกแบบแล้ว ยัง Save เก็บไว้เพื่อนำไปพิมพ์กับเครื่องพิมพ์ 3D Printer ได้อีกด้วย Tinkercad เป็นโปรแกรมที่ผ่านการพัฒนา โดยบริษัท Autodesk โปรแกรม Tinkercad มีรูปแบบการใช้งานง่ายตาย ไม่ซับซ้อน เหมาะมากสำหรับคนที่ต้องการเรียนรู้วิธีสร้าง ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 สัญลักษณ์โปรแกรม TinkerCAD

3.3.4 Blynk Application

Blynk เป็นแพลตฟอร์ม ที่เป็นแอปพลิเคชัน ด้วย iOS และ Android เพื่อควบคุม Arduino, Raspberry Pi บนระบบอินเทอร์เน็ต ซึ่งเป็นแผงควบคุมระบบดิจิทัลที่ผู้ใช้สามารถสร้างส่วนต่อประสานกราฟิกสำหรับโครงการของผู้ใช้โดยการลากและวางเครื่องมือ (Widgets) ที่มีให้เลือกอยู่ไม่จำกัด

This material is reserved for educational use only; not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Blynk ไม่ได้ผูกติดอยู่กับบอร์ดหรือบอร์ดเสริมบางตัว แต่จะสนับสนุนฮาร์ดแวร์ที่นักพัฒนาเลือก ไม่ว่าจะเป็น Arduino หรือ Raspberry Pi จะเชื่อมโยงกับอินเทอร์เน็ตผ่านสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi) หรือแบบมีสาย จะช่วยให้อุปกรณ์ของนักพัฒนาออนไลน์และพร้อมสำหรับ Internet of Things (IoT)



รูปที่ 3.13 สัญลักษณ์แอปพลิเคชัน Blynk

3.4 การออกแบบและการวางแผนการทำงาน

3.4.1 การออกแบบและการวางแผนทางด้านฮาร์ดแวร์

1. ศึกษาและเลือกเซนเซอร์ที่ต้องการ
2. ศึกษาและเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งาน
3. ทดสอบผลการวัดและทำการ Normalization เซนเซอร์
4. เลือกอุปกรณ์สำหรับแหล่งจ่ายไฟ และอุปกรณ์อื่นๆ ที่ต้องใช้ในการต่อร่วมกัน
5. ออกแบบชุดอุปกรณ์ระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย และระบบควบคุม
6. ประกอบอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปแบบที่ออกแบบไว้

3.4.2 การออกแบบและการวางแผนทางด้านซอฟต์แวร์

1. ศึกษาโปรแกรมที่จะนำมาเขียนให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
2. กำหนดรูปแบบการแสดงผล
3. เขียนโปรแกรม Arduino เพื่อรับค่าจากเซนเซอร์ ควบคุมการทำงานของระบบ และส่งค่าไปแสดงผลตามรูปแบบที่กำหนด
4. เขียนโปรแกรม Arduino เพื่อเชื่อมต่อการรับ-ส่งค่าบนแอปพลิเคชันในสมาร์ทโฟน
5. สร้างส่วน GUI (Graphical user interface) และจอแสดงผลผ่านบนแอปพลิเคชัน Blynk
6. ทดสอบการทำงานร่วมกันระหว่างชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมที่ได้ประกอบไว้กับแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านเครือข่ายไร้สาย WiFi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

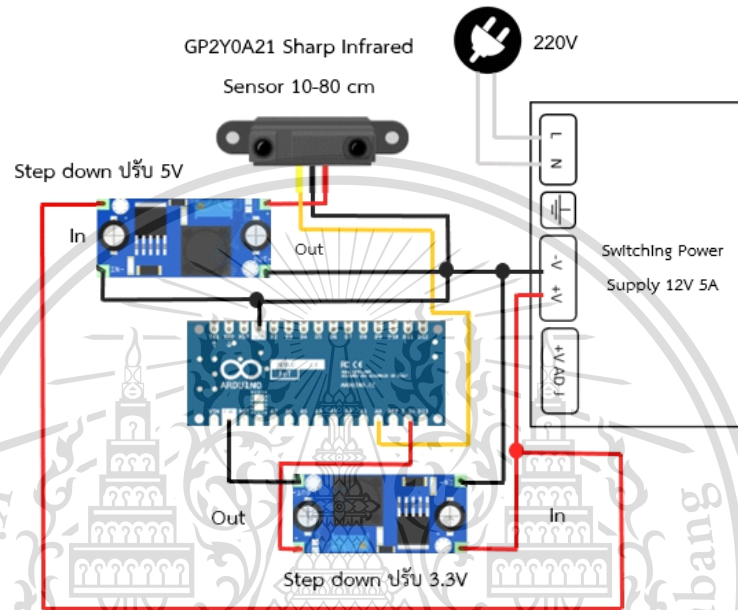
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.5 วิธีการดำเนินงาน

3.5.1 การทดสอบเซนเซอร์

การทดสอบการทำงานของ GP2Y0A21 Sharp Infrared Sensor 10-80 cm

ทดสอบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระยะระหว่างเซนเซอร์และวัตถุ โดยจะนำโมดูลเซนเซอร์ต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino nano 33 IoT ดังรูปที่ 3.14



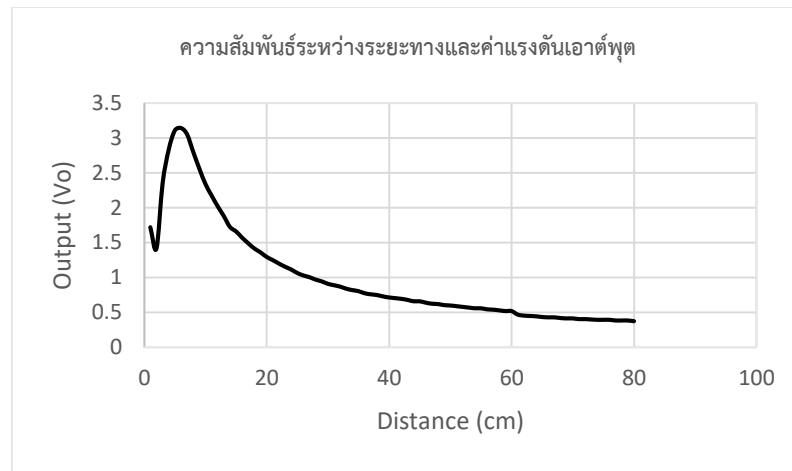
รูปที่ 3.14 วงจรการต่อเซนเซอร์กับบอร์ด Arduino nano 33 IoT

ในการทดสอบจะวางเซนเซอร์ไว้ด้านบนของท่ออะคริลิกที่มีความยาว 40 cm ในแนวตั้งฉากกับพื้น เมื่อทดสอบให้เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุที่ระยะต่างๆ เริ่มตั้งแต่ที่ระยะ 10 cm จนถึงระยะ 40 cm โดยการนำวัตถุวางไว้ในบริเวณตรงข้ามกับเซนเซอร์ และเปลี่ยนแปลงระยะทางทุกๆ 1 cm การเปลี่ยนแปลงของระยะทางนั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์ และเมื่อวัตถุออกห่างจากเซนเซอร์มาก จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงในรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

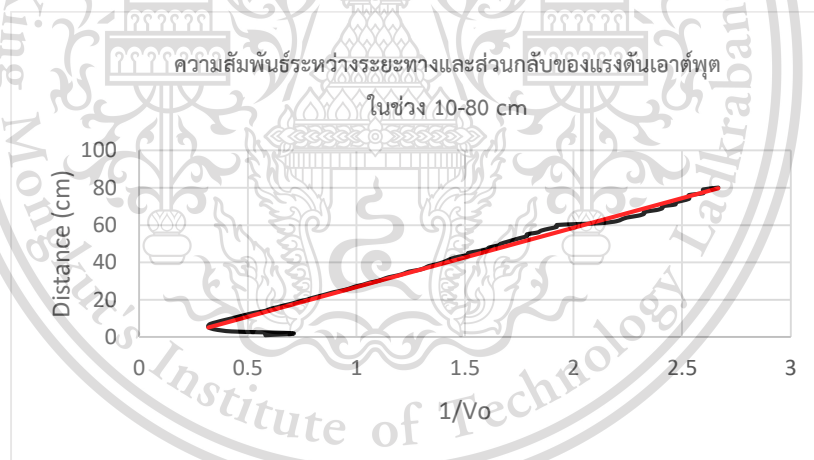
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าแรงดันเอาต์พุต

การสอบเทียบ (Calibration) ของ GP2Y0A21 Sharp Infrared Sensor 10-80 cm

การสอบเทียบซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่ากันระหว่างระยะทางและส่วนกลับของแรงดันเอาต์พุต จากกราฟรูปที่ 3.15 จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและส่วนกลับของแรงดันเอาต์พุต ดังรูปที่ 3.16



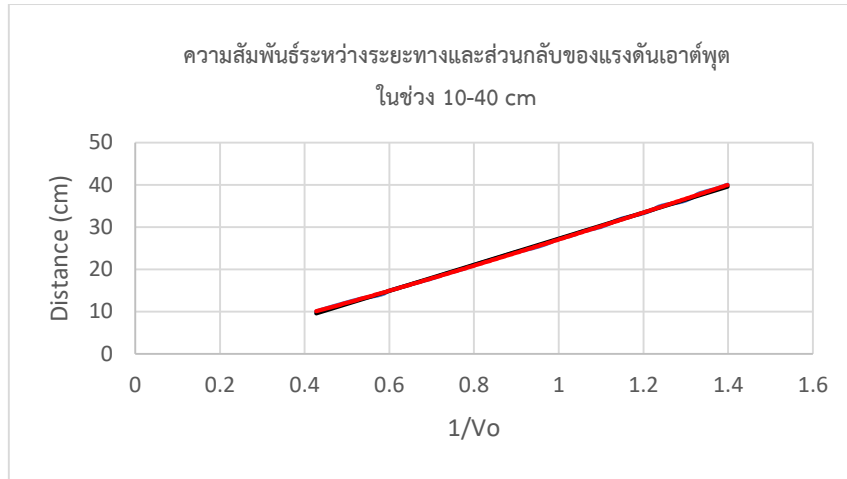
รูปที่ 3.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าส่วนกลับแรงดันเอาต์พุต ในช่วง 10 – 80 cm

หลังจากนั้นได้ทำการเลือกช่วงของกราฟที่มีความเป็นเชิงเส้นแล้ว จะได้ช่วงที่ระยะ 10-40 cm ซึ่งช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่นำมาใช้งาน ดังกราฟรูปที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

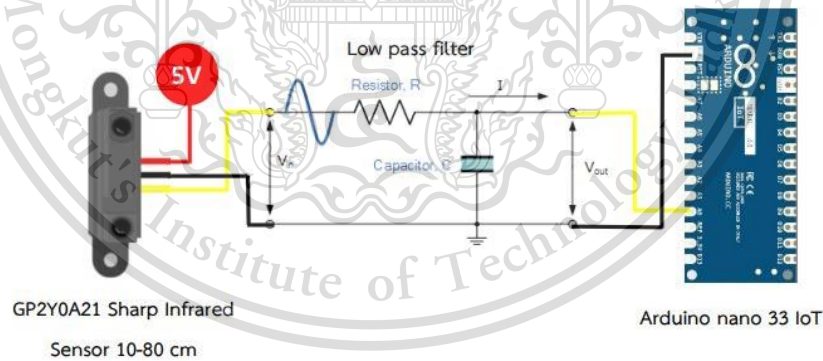
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง และส่วนกลับของค่าแรงดันเอาต์พุต ในช่วง 10 – 40 cm

ทำการกรองค่าความถี่สัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่ไม่ต้องการใช้งานออก โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) ต่อเข้ากับเซนเซอร์ ดังรูปที่ 3.18

หลังจากได้ช่วงที่ต้องการใช้งานแล้ว จึงได้ทำการ Output scaling factor เพื่อทำการ Normalization ค่าของเอาต์พุตให้เหมาะกับการใช้งาน โดยการเขียนโปรแกรมผ่าน Arduino IDE โดยใช้คำสั่ง map จะได้ดังนี้ $distance = map(Input, 780, 260, 10, 40)$;



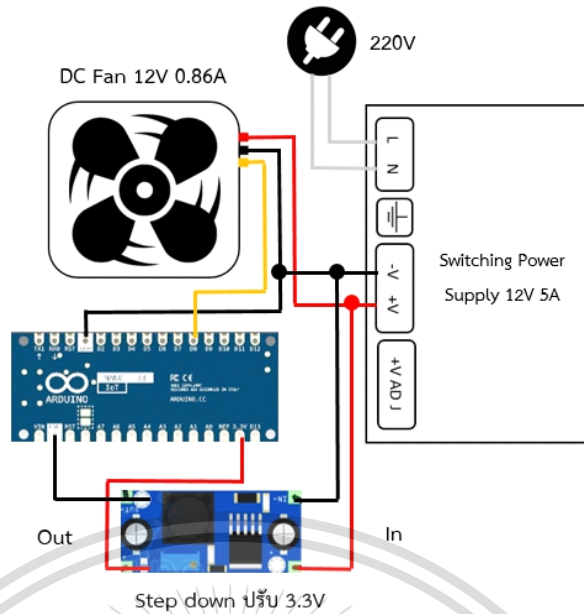
รูปที่ 3.18 การต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

3.5.2 การทดสอบการทำงานของพัลลัม

ทดสอบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของพัลลัมที่เอาต์พุตค่าต่างๆ เพื่อหาช่วงการทำงานเริ่มต้น และช่วงสูงสุดการหมุนของพัลลัมที่จะนำมาใช้ จะทำให้พัลลัมหมุนเร็วขึ้น โดยจะนำพัลลัมต่อเข้ากับ เอกสารนี้เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino nano 33 IoT ดังรูปที่ 3.19 นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.19 วงจรการต่อพัดลมกับบอร์ด Arduino nano 33 IoT

ซึ่งหลังจากการทดสอบจะพบว่าช่วงที่เหมาะสมกับการใช้งาน ค่าเอาต์พุตจะอยู่ในช่วง 180-255 และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่า error ความเร็วของพัดลมจะเปลี่ยนแปลงตาม โดยค่า error มีความสัมพันธ์กับแบบผกผัน กล่าวคือเมื่อค่า error เป็นลบความเร็วของพัดลมจะสูงขึ้นและหากค่า error เป็นบวกความเร็วพัดลมจะอ่อนลง

3.5.3 การเขียนโปรแกรม Arduino

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อรับค่าจากเซนเซอร์มาประมวลผล และส่งค่าไปเพื่อควบคุมความเร็วในการหมุนของพัดลม

```

include_PIDblynk | Arduino 1.8.10
File Edit Sketch Tools Help

include_PIDblynk

#define BLYNK_PRINT Serial

#include <SPI.h>
#include <WiFiNINA.h>
#include <BlynkSimpleWiFiNINA.h>
#include "secret.h"
BlynkTimer timer;
float pv;
//double kpapp, kiapp, kdapp;
int newDistance, newpv, newsetpoint, output, setpoint, kpapp, kiapp, kdapp;

//-----

#define PIN_OUTPUT 2
double Kp, Ki, Kd;
unsigned long lastTime;
double Input, Output, Setpoint;
double ITerm, lastInput, distance;
double kp, ki, kd;
int SampleTime = 100; //0.1 sec
double outMin, outMax;
int inAuto = false;

#define MANUAL 0
#define AUTOMATIC 1

#define DIRECT 0
#define REVERSE 1
int controllerDirection = REVERSE;

#define F_ON 0
    
```

1

2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

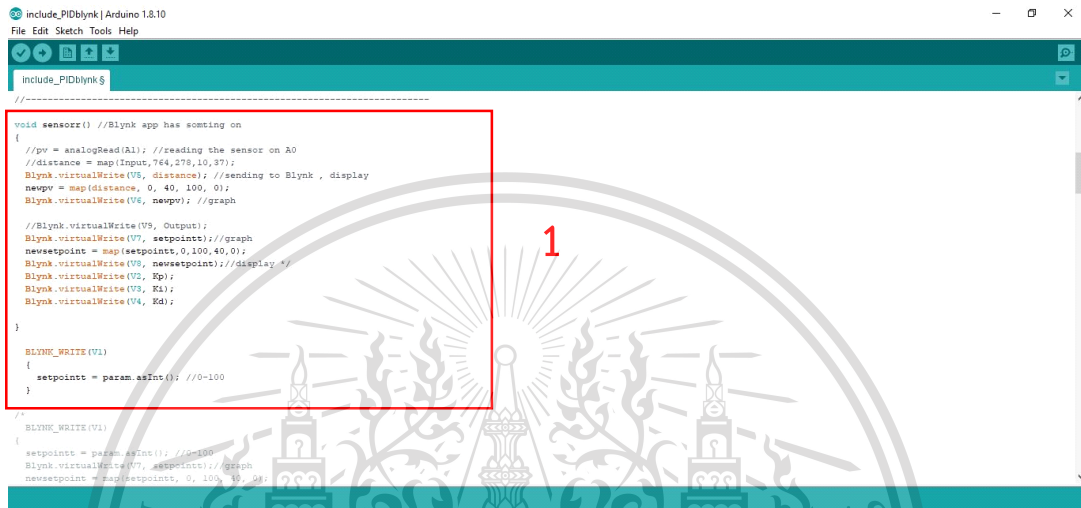
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.20 หน้าต่างโปรแกรม Arduino (1)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 3.20 จะประกอบด้วย 2 ส่วน เริ่มจากส่วนที่ 1 คือส่วนของการเรียกใช้ไลบรารีที่จำเป็นต่อการเรียกใช้คำสั่งเพื่อเขียนสั่งระบบในการประมวลผล รับ-ส่งข้อมูล และเชื่อมต่อแอปพลิเคชัน Blynk ที่ใช้สำหรับเป็นตัวกลางในการส่งข้อมูลไปยังแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ และส่วนที่ 2 คือส่วนสำหรับการประกาศตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการเขียนคำสั่งในการควบคุมระบบ และสั่งให้เชื่อมต่อกับแอปพลิเคชัน Blynk



```

include_PIDblynk | Arduino 1.8.10
File Edit Sketch Tools Help

include_PIDblynk $

//-----
void sensor() //Blynk app has something on
{
  //pw = analogRead(A1); //reading the sensor on A0
  //distance = map(input,74,279,10,37);
  Blynk.virtualWrite(V5, distance); //sending to Blynk , display
  newpw = map(distance, 0, 40, 100, 0);
  Blynk.virtualWrite(V6, newpw); //graph

  //Blynk virtualWrite(V5, Output);
  Blynk.virtualWrite(V7, setpoint); //graph
  newsetpoint = map(setpoint, 0, 100, 40, 0);
  Blynk.virtualWrite(V8, newsetpoint); //display */
  Blynk.virtualWrite(V2, Rp);
  Blynk.virtualWrite(V3, Kf);
  Blynk.virtualWrite(V4, Kd);
}

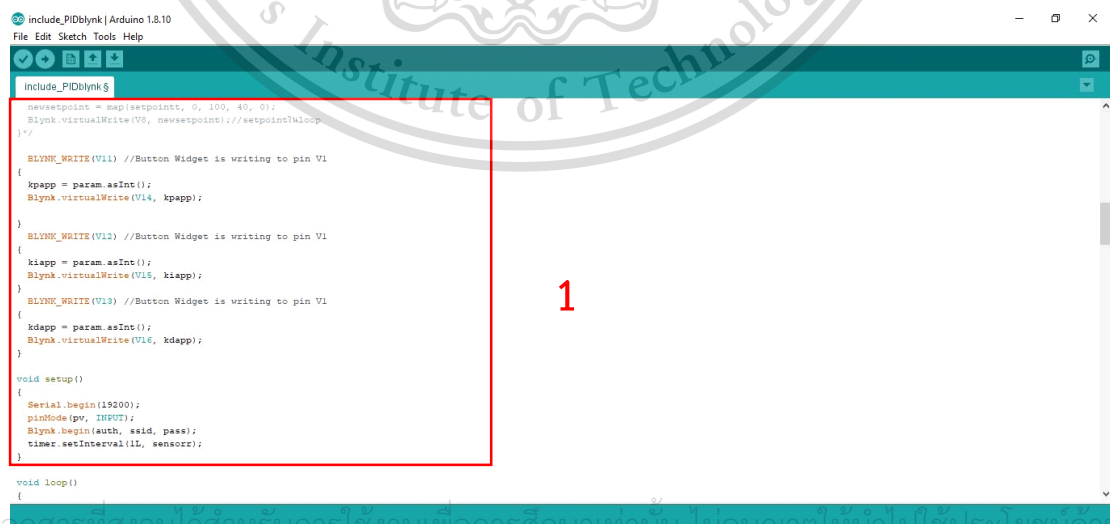
BLYNK_WRITE(V1)
{
  setpoint = param.asInt(); //0-100
}

//
BLYNK_WRITE(V1)
{
  setpoint = param.asInt(); //0-100
  Blynk.virtualWrite(V7, setpoint); //graph
  newsetpoint = map(setpoint, 0, 100, 40, 0);
}

```

รูปที่ 3.21 หน้าต่างโปรแกรม Arduino (2)

จากรูปที่ 3.21 จะประกอบด้วย 1 ส่วน คือส่วนคำสั่งที่เขียนขึ้นเพื่อเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชัน Blynk โดยจะทำการกำหนดขาอินพุตและเอาต์พุตเพื่อกำหนดหน้าที่ให้การทำงานในแอปพลิเคชัน เช่น การแสดงกราฟ การอ่านและเขียนข้อมูลลงบอร์ดเพื่อควบคุมตัวระบบจริง



```

include_PIDblynk | Arduino 1.8.10
File Edit Sketch Tools Help

include_PIDblynk $

newsetpoint = map(setpoint, 0, 100, 40, 0);
Blynk.virtualWrite(V8, newsetpoint); //setpoint(loop
)*/
BLYNK_WRITE(V11) //Button Widget is writing to pin V1
{
  kpapp = param.asInt();
  Blynk.virtualWrite(V14, kpapp);
}

BLYNK_WRITE(V12) //Button Widget is writing to pin V1
{
  kiapp = param.asInt();
  Blynk.virtualWrite(V15, kiapp);
}

BLYNK_WRITE(V13) //Button Widget is writing to pin V1
{
  kdapp = param.asInt();
  Blynk.virtualWrite(V16, kdapp);
}

void setup()
{
  Serial.begin(19200);
  pinMode(pw, INPUT);
  Blynk.begin(auth, ssid, pass);
  timer.setInterval(1L, sensor);
}

void loop()
{

```

รูปที่ 3.22 หน้าต่างโปรแกรม Arduino (3)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 3.22 จะประกอบด้วย 1 ส่วนคือ เป็นส่วนที่กำหนดตัวแปรเพื่อเขียนค่าจากแอปพลิเคชันลงบอร์ด เป็นส่วนที่เป็นตัวแปรของชื่อ (ssid) และรหัส (pass) การเชื่อมต่อ Wi-Fi ที่ต้องการจะเชื่อมต่อ และรหัสของหน้า Thing (auth) ในการใช้งานแอปพลิเคชัน Blynk และเป็นส่วนที่มีการกำหนดเวลา (timer) เพื่อให้มีการวนลูปจากบอร์ดเข้าสู่แอปพลิเคชันตามที่ต้องการ

```

include_PIDblynk | Arduino 1.8.10
File Edit Sketch Tools Help

include_PIDblynk $

void Compute()
{
  double volts = (Input / 1023.0) * 5;
  //Serial.println("v"); Serial.println(Input);
  //if (Input >=)
  distance = map(Input, 780, 260, 10, 40);

  if (!inAuto) return;
  unsigned long now = millis();
  int timeChange = (now - lastTime);
  if (timeChange == SampleTime)
  {
    /*Compute all the working error variables*/
    double error = Setpoint - distance;
    Serial.println("v distance");
    Serial.println(distance);
    Serial.println("v error");
    Serial.println(error);
    ITerm = (ki * error);
    Serial.println("v ki");
    Serial.println(ki);
    if (ITerm > outMax) ITerm = outMax;
    else if (ITerm < outMin) ITerm = outMin;
    double dInput = (distance - lastInput);
    Serial.println("v kp");
  }
}

```

รูปที่ 3.23 หน้าต่างโปรแกรม Arduino (4)

จากรูปที่ 3.23 จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 จะเป็นการทำ Output scaling factor เพื่อทำการ Normalization ค่าของเอาต์พุตให้เหมาะกับการใช้งาน โดยการเรียกใช้คำสั่ง Map และส่วนที่ 2 จะเป็นการคำนวณ และแสดงค่าต่างๆของการปรับจูนระบบควบคุมด้วยค่าคงที่ของตัวควบคุมพีไอดี

```

include_PIDblynk | Arduino 1.8.10
File Edit Sketch Tools Help

include_PIDblynk $

else if (ITerm > outMin) ITerm = outMin;
double dInput = (distance - lastInput);
Serial.println("v kp");
Serial.println(kp);
//Compute P-Term
if (pOnE) Output = kp * error;
else
{
  ITerm += kp * dInput;
  Output = ITerm;
}
Serial.println("v kd");
Serial.println(kd); //RU
Serial.println("v ITerm");
Serial.println(ITerm);
/*Compute Deriv of PID Output*/
Output += ITerm - kd * dInput;
Serial.println("v output");
Serial.println(Output);

if (Output < outMin)
{
  Output = outMin;
}
else if (Output > outMax)
{
  Output = outMax;
}
analogWrite(PIN_OUTPUT, Output);

```

รูปที่ 3.24 หน้าต่างโปรแกรม Arduino (5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 3.24 จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 จะเป็นการคำนวณ และแสดงค่าต่างๆของการปรับจูนระบบควบคุมด้วยค่าคงที่ของตัวควบคุมพีไอดีที่ต่อจากส่วนแรกในรูปที่ 3.25 และส่วนที่ 2 จะเป็นในส่วนของการควบคุมการทำงานของพัดลม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

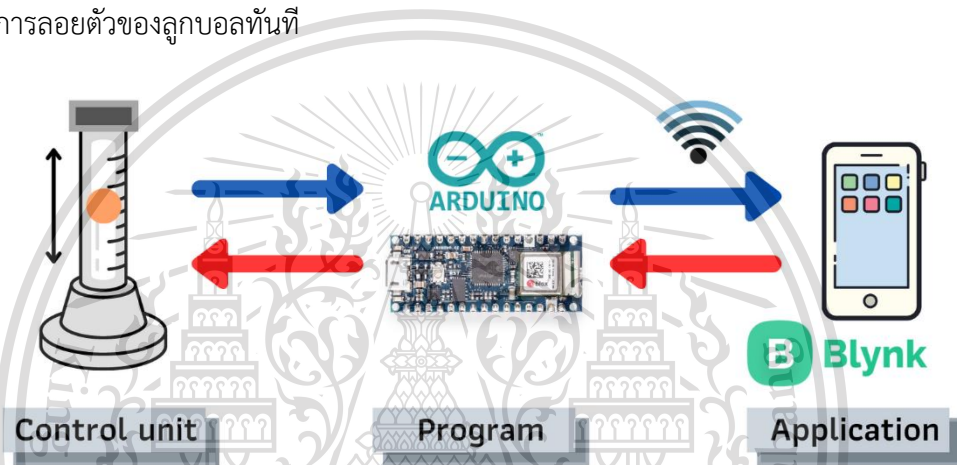
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย

ชุดระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลจะสื่อสารกับบอร์ด Arduino nano 33 IoT ซึ่งทางบอร์ด Arduino nano 33 IoT จำเป็นต้องถูกอัปโหลดโปรแกรมไว้แล้ว และผู้ใช้ต้องมีแอปพลิเคชัน Blynk เมื่อทางผู้ใช้สั่งการทำงานผ่านแอปพลิเคชัน ข้อมูลชุดคำสั่งจะส่งไปยังบอร์ด Arduino nano 33 IoT ที่เชื่อมต่อ Wi-Fi จากนั้นบอร์ด Arduino nano 33 IoT จะทำการสั่งการทำงานของชุดระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลทันที



รูปที่ 4.1 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย

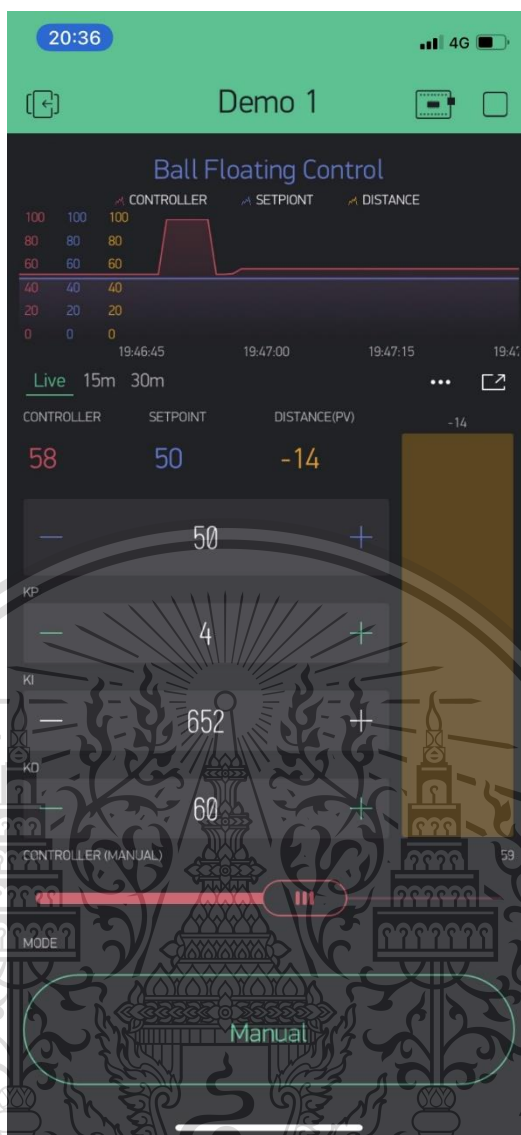
4.2 ผลการออกแบบหน้าแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

ส่วนของหน้าจอแสดงผลในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงส่วนหน้าจอแสดงผลภายในแอปพลิเคชันที่แสดงค่าผลลัพธ์ต่างๆ ได้แก่ กราฟแสดงผล ประกอบไปด้วยค่า Set point, Output และ Process Value (PV) ส่วนแสดงระดับของลูกบึงปองที่ระดับต่างๆ แสดงในรูปแบบของบาร์แท่ง (Bar vertical) ส่วนที่เป็นปุ่มคำสั่งสำหรับเพิ่ม-ลดค่าเพื่อเปลี่ยนค่า Set point, Kp, Ki, Kd และ Controller รวมถึงส่วนสำหรับเลือกโหมดการทำงานของการควบคุมระบบในโหมดอัตโนมัติและโหมดปรับด้วยมือ ดังแสดงรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 หน้าแอปพลิเคชัน Blynk ที่ออกแบบ

4.3 ผลการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย

ทำการติดตั้งชุดควบคุม โดยภายในชุดอุปกรณ์ควบคุมประกอบด้วย วงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ได้ออกแบบขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4

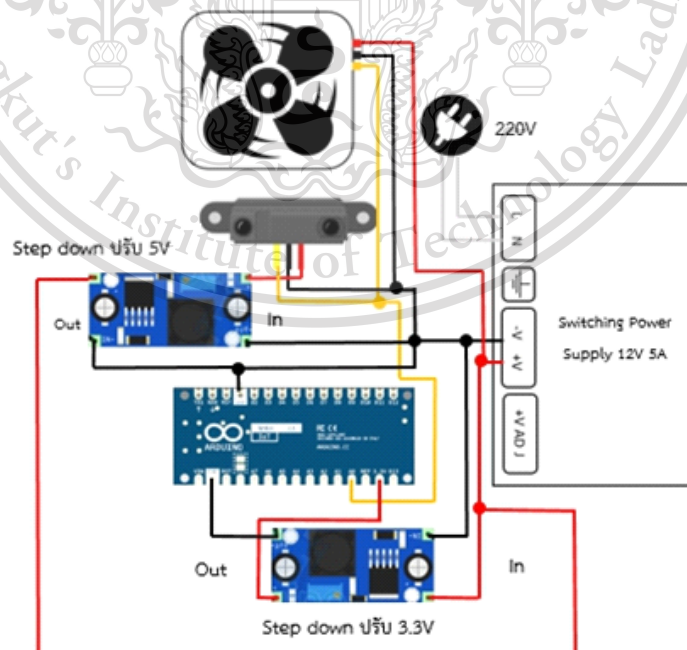
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.3 ชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาใดๆ และต้องขออนุญาตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สาย

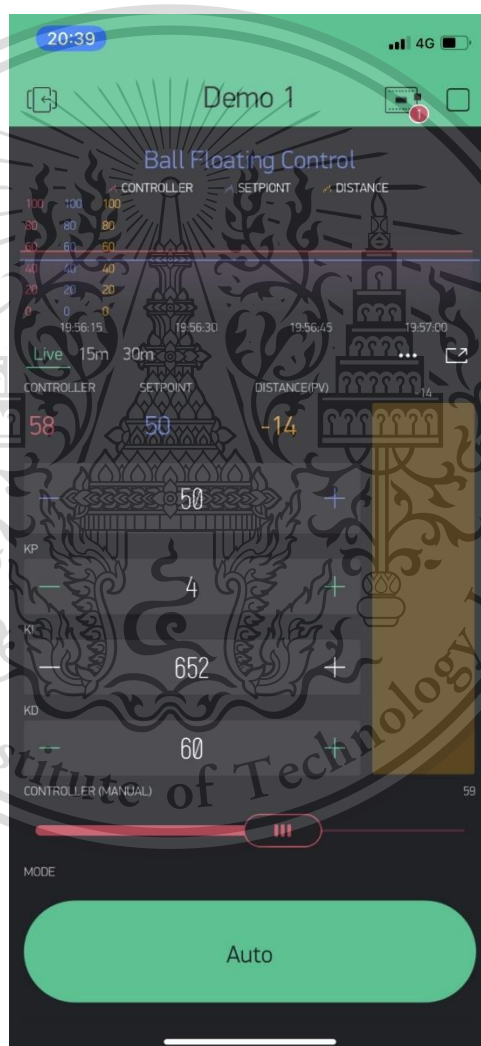
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.4 การทดสอบการทำงาน

4.4.1 ทดสอบการรับ-ส่งข้อมูล และการแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โหมดอัตโนมัติ (Automation mode)

การทดสอบการรับ-ส่งข้อมูล และการแสดงผลระหว่างระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายและแอปพลิเคชัน Blynk ในโหมดอัตโนมัติ (Automation mode) ซึ่งส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงการทำงานของระบบและการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ในโหมดควบคุมแบบอัตโนมัติ โดยโหมดควบคุมนี้สามารถทำการปรับค่าพารามิเตอร์ Kp, Ki, Kd, และ Setpoint ได้ตามที่ต้องการ และสามารถแสดงค่าต่างๆ ผ่านบนแอปพลิเคชัน Blynk ดังแสดงรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การควบคุมระบบผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โหมดอัตโนมัติ

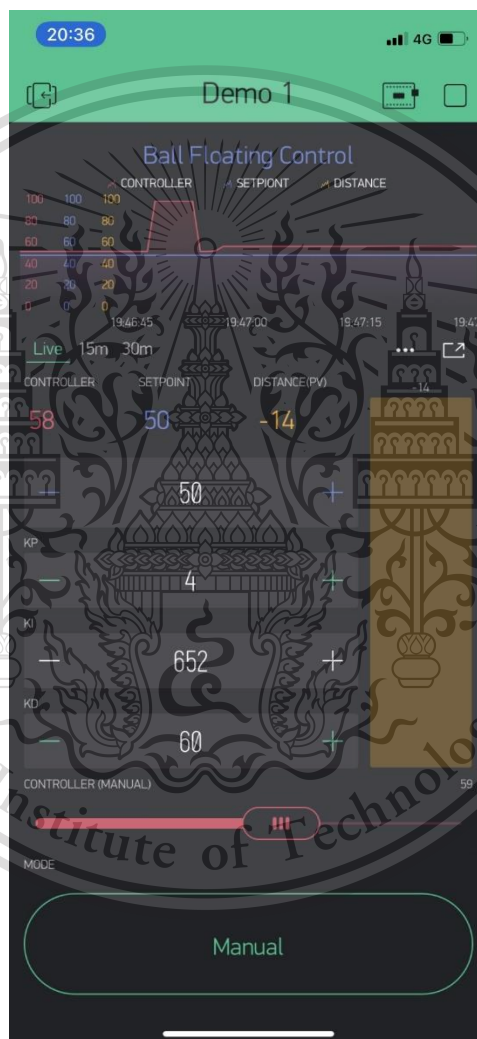
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.4.2 ทดสอบการรับ-ส่งข้อมูล และการแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โหมดการปรับด้วยมือ (Manual mode)

ทดสอบการรับ-ส่งข้อมูล และการแสดงผลระหว่างระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายและแอปพลิเคชัน Blynk โหมดการปรับด้วยมือ (Manual mode) ซึ่งส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงการทำงานของระบบและการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ในโหมดการปรับด้วยมือ โดยโหมดควบคุมนี้สามารถทำการปรับค่าของคอนโทรลเลอร์ได้ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ และสามารถแสดงค่าต่างๆ ผ่านบนแอปพลิเคชัน Blynk ดังแสดงรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การควบคุมระบบผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โหมดการปรับด้วยมือ

4.5 ผลการทดสอบการควบคุมระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การทดสอบการควบคุมระบบ ซึ่งกลุ่มของผู้จัดทำได้ใช้วิธีการปรับจูนแบบ Trial & error ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามไม่ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ close-loop tuning วิธีนี้คือการทดลองป้อน Kp, Ki เข้าระบบ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระบบ

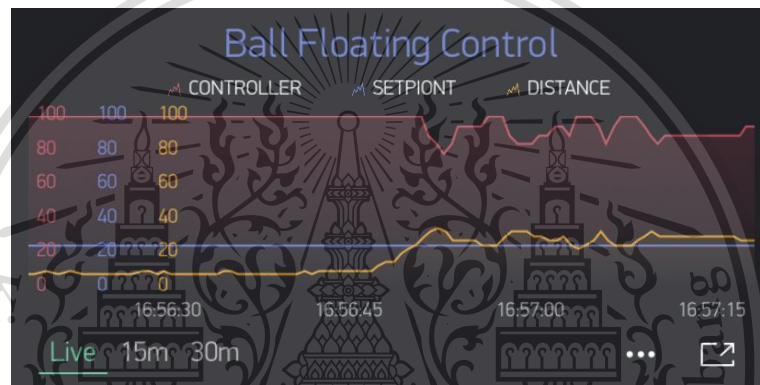
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และหาค่าที่ทำให้ระบบสมดุลมากที่สุด โดยมีขั้นตอนการปรับจูน ตามหัวข้อที่ 2.5.2 การปรับจูนค่าคงที่ของตัวควบคุม

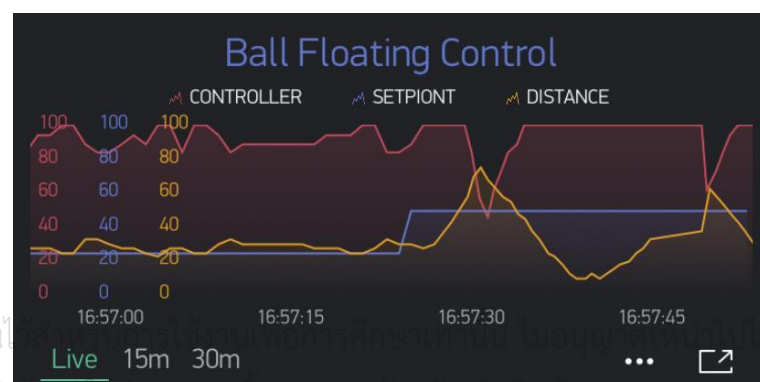
4.5.1 ผลการทดสอบการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ P controller

การใช้ตัวควบคุมแบบพีในระบบควบคุมนั้น เมื่อปรับค่า Set point ให้อยู่ที่จุด 25% ทำให้ผลตอบสนองวงปิดของระบบลดค่าความผิดพลาด (Steady state error, ess) ช่วยเพิ่มความเร็วของผลตอบสนองในช่วงแรกได้ (Rise time, t_r) มีแนวโน้มของการเกิดค่าพุ่งเกิน (Overshoots, M_p) เกิดความถี่ในการแกว่ง (Oscillation) ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งผลตอบสนองของระบบที่ได้สอดคล้องตามทฤษฎี ดังตารางที่ 2.1 และค่าของ Process variable (PV) มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าของ Set point



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ P controller ที่จุด Set point 25%

และการใช้ตัวควบคุมแบบพีในระบบควบคุม เมื่อปรับค่า Set point ให้อยู่ที่จุด 50% ทำให้ผลตอบสนองวงปิดของระบบมีความเร็วของผลตอบสนองในช่วงแรก (Rise time, t_r) มีแนวโน้มของการเกิดค่าพุ่งเกินที่สูง (Overshoots, M_p) เกิดความถี่ในการแกว่งที่สูงมาก (Oscillation) ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งผลตอบสนองของระบบที่ได้สอดคล้องตามทฤษฎี ดังตารางที่ 2.1 และค่าของ Process variable (PV) มีแนวโน้มออกห่างจากค่าของ Set point



รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ P controller ที่จุด Set point 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน

ประโยชน์ด้านการค้า

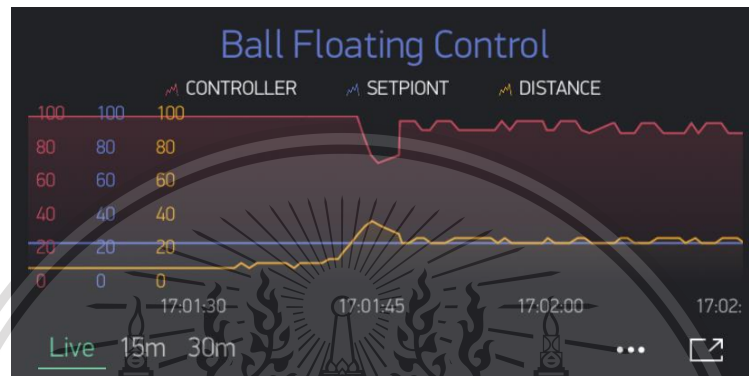
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

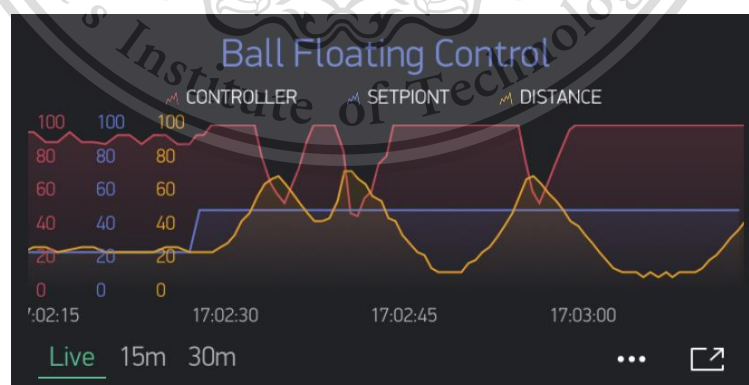
4.5.2 ผลการทดสอบการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PI controller

การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในระบบควบคุมนั้น เมื่อปรับค่า Set point ให้อยู่ที่จุด 25% ทำให้ผลตอบสนองวงปิดของระบบทำงานเร็วขึ้นในช่วงแรก (Rise time, t_r) ค่าความผิดพลาดลดลงมาก (Steady state error, e_{ss}) การเกิดค่าพุ่งเกินลดลง (Overshoots, M_p) เกิดความถี่ในการแกว่ง (Oscillation) ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งผลตอบสนองของระบบที่ได้สอดคล้องตามทฤษฎี ดังตารางที่ 2.1 และค่าของ Process variable (PV) มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าของ Set point



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PI controller ที่จุด Set point 25%

และการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในระบบควบคุมนั้น เมื่อปรับค่า Set point ให้อยู่ที่จุด 50% ทำให้ผลตอบสนองวงปิดของระบบทำงานเร็วขึ้นในช่วงแรก (Rise time, t_r) เกิดค่าพุ่งเกินเพิ่มขึ้น (Overshoots, M_p) เกิดความถี่ในการแกว่งสูง (Oscillation) ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งผลตอบสนองของระบบที่ได้ไม่สอดคล้องตามทฤษฎี ดังตารางที่ 2.1 และค่าของ Process variable (PV) มีแนวโน้มออกห่างจากค่าของ Set point



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PI controller ที่จุด Set point 50%

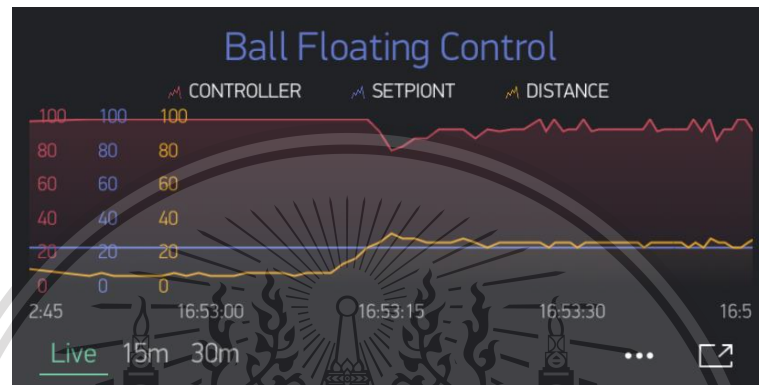
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

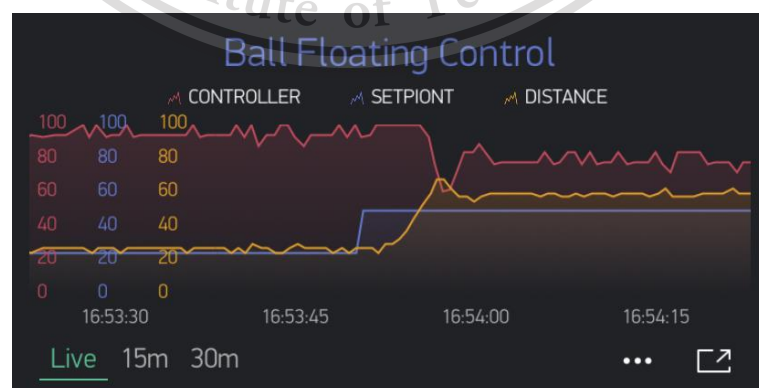
4.5.3 ผลการทดสอบการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PD controller

การใช้ตัวควบคุมแบบพีดีในระบบควบคุมนั้น เมื่อปรับค่า Set point ให้อยู่ที่จุด 25% ทำให้ผลตอบสนองวงปิดของระบบทำงานถึงจุดคงที่ (Steady state) เร็วขึ้น ค่าความผิดพลาดลดลง (Steady state error, ess) การเกิดค่าพุ่งเกินลดลง (Overshoots, Mp) และความถี่ในการแกว่งลดลง (Oscillation) ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งผลตอบสนองของระบบที่ได้สอดคล้องตามทฤษฎี ดังตารางที่ 2.1 และค่าของ Process variable (PV) มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าของ Set point



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PD controller ที่จุด Set point 25%

และการใช้ตัวควบคุมแบบพีดีในระบบควบคุมนั้น เมื่อปรับค่า Set point ให้อยู่ที่จุด 50% ทำให้ผลตอบสนองวงปิดของระบบทำงานถึงจุดคงที่ (Steady state) เร็วขึ้น (Setting time, ts) ค่าความผิดพลาดลดลง (Steady state error, ess) การเกิดค่าพุ่งเกินลดลง (Overshoots, Mp) และความถี่ในการแกว่งลดลง (Oscillation) ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งผลตอบสนองของระบบที่ได้สอดคล้องตามทฤษฎี ดังตารางที่ 2.1 และค่าของ Process variable (PV) มีแนวโน้มออกจากค่าของ Set point เล็กน้อย



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PD controller ที่จุด Set point 50%

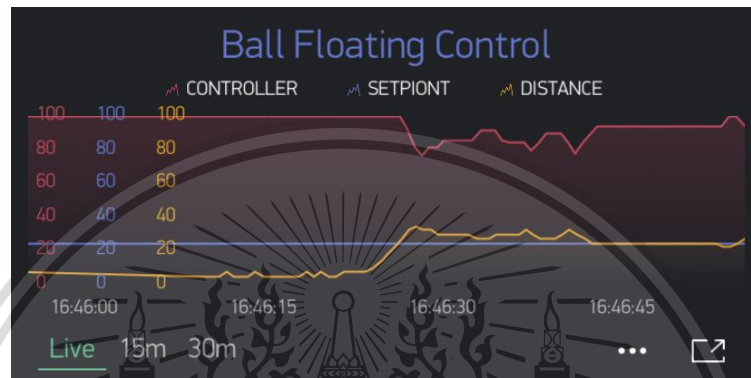
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ให้ทั่วถึงโดยไม่มีการคิดค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

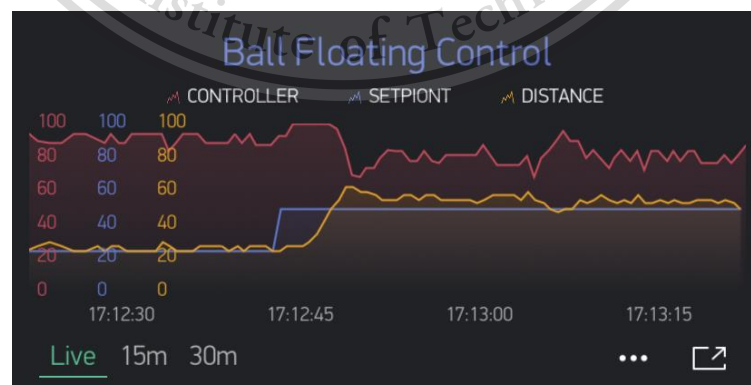
4.5.4 ผลการทดสอบการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PID controller

การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีในระบบควบคุมนั้น เมื่อปรับค่า Set point ให้อยู่ที่จุด 25% ทำให้ผลตอบสนองวงปิดของระบบทำงานถึงจุดคงที่ (Steady state) เร็วขึ้น ค่าความผิดพลาดลดลง (Steady state error, ess) เกิดค่าพุ่งเกินในช่วงแรก (Overshoots, Mp) และเกิดความถี่ในการแกว่งช่วงแรก (Oscillation) ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งผลตอบสนองของระบบที่ได้สอดคล้องตามทฤษฎี ดังตารางที่ 2.1 และค่าของ Process variable (PV) มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าของ Set point



รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PID controller ที่จุด Set point 25%

การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีในระบบควบคุมนั้น เมื่อปรับค่า Set point ให้อยู่ที่จุด 50% ทำให้ผลตอบสนองวงปิดของระบบทำงานถึงจุดคงที่ (Steady state) เร็วขึ้น ค่าความผิดพลาดลดลง (Steady state error, ess) เกิดค่าพุ่งเกิน (Overshoots, Mp) และเกิดความถี่ในการแกว่ง (Oscillation) ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งผลตอบสนองของระบบที่ได้สอดคล้องตามทฤษฎี ดังตารางที่ 2.1 และค่าของ Process variable (PV) มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าของ Set point



รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PID controller ที่จุด Set point 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากผลการทดสอบ ผู้จัดทำได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PID controller ให้กับระบบควบคุมการลอยตัวของลูกปิงปอง เนื่องจากตัวควบคุมแบบ PID controller ให้ผลตอบสนองของระบบมีความสอดคล้องตามทฤษฎีมากที่สุด และค่าของ Process variable (PV) มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าของ Set point มากที่สุด ทั้งนี้การเลือกใช้ชนิดของตัวควบคุมขึ้นอยู่กับ การเลือกค่าพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสมกับระบบ โดยสามารถอาศัยแนวคิดพื้นฐานเดียวกันกับที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง หัวข้อที่ 2.5 ระบบควบคุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมา เริ่มจากขั้นตอนแรกคือ ขั้นตอนของการศึกษา ทฤษฎีและหลักการพร้อมทำความเข้าใจกับขอบเขตของโครงการ ดังนั้นจึงได้แบ่งส่วนของการดำเนินงานเป็นทั้งหมด 3 ส่วน คือ

1. ส่วนของการสร้างด้านฮาร์ดแวร์ ในส่วนนี้ได้ศึกษาถึงหลักการการทำงานของเซนเซอร์ บอร์ดควบคุม และอุปกรณ์ด้านฮาร์ดแวร์ต่างๆ รวมถึงการออกแบบชิ้นงานให้สอดคล้องกับความต้องการ และวัสดุประสงคืให้มากที่สุด

2. ส่วนของการเขียนโปรแกรมด้านซอฟต์แวร์ เป็นส่วนของการเขียนโปรแกรมเพื่อการสื่อสารระหว่างแอปพลิเคชันและชุดอุปกรณ์ควบคุม รวมถึงการรับ-ส่งค่าระหว่างอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ต่างๆ ด้วยโปรแกรม Arduino IDE อีกทั้งทำการออกแบบหน้าแอปพลิเคชัน Blynk ในการติดต่อระหว่างผู้ใช้กับชุดอุปกรณ์ควบคุมเพื่อให้ผู้ใช้สามารถใช้งานได้โดยง่าย

3. หลังจากที่ได้ออกแบบและประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ควบคุมเรียบร้อยแล้ว จึงนำชุดอุปกรณ์มาทำการทดสอบด้วยการควบคุมการทำงานของระบบผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ด้วยสมาร์ทโฟน และพบว่าชุดอุปกรณ์สามารถใช้งานได้จริง บอร์ด Arduino nano 33 IoT สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้เพื่อส่งข้อมูลแบบ Real-Time เป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างชุดอุปกรณ์ควบคุมและแอปพลิเคชันได้

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

1. เนื่องจากโครงการนี้มีเรื่องใหม่ๆ ที่ยังไม่เชี่ยวชาญ จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมเพื่อที่จะนำมาใช้ในโครงการนี้

2. ในการประกอบอุปกรณ์ของชุดควบคุม จำเป็นต้องใช้ทักษะในการบัดกรีและเชื่อมโยงสาย จึงต้องใช้เวลาในการวางแผนและปฏิบัติ

3. การเขียนโปรแกรม Arduino IDE ยังขาดความชำนาญในการเขียน ซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลาในการศึกษารูปแบบการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมในช่วงแรก และยังมีข้อบกพร่องในความละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.3 แนวทางการแก้ไข้ปัญหา

1. ศึกษาและสอบถามแนวทางเพิ่มเติมจากสื่อการสอนต่างๆ รวมถึงอาจารย์ที่ปรึกษา
2. วางแผนโครงสร้างของด้านฮาร์ดแวร์ทั้งหมดก่อนทำการประกอบ
3. ศึกษาการเขียนโปรแกรมและสอบถามจากผู้ที่มีความชำนาญในการเขียน

5.4 การพัฒนาในอนาคต

1. ออกแบบและพัฒนาการทำงานของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายที่สามารถเลือกใช้งานฟังก์ชันต่างๆ ผ่านบนเว็บเบราว์เซอร์ได้
2. ออกแบบและพัฒนาการทำงาน รวมถึงสร้างชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายที่มีความสูงของท่ออะคริลิคมากกว่า 40 cm
3. สามารถนำชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมการลอยตัวของลูกบอลแบบไร้สายไปประยุกต์ใช้งานสำหรับห้องปฏิบัติการระยะไกลหรือห้องปฏิบัติการออนไลน์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] “บอร์ด Arduino nano 33 IoT” เข้าถึงได้จาก: <https://store.arduino.cc/usa/nano-33-iot>
- [2] “หลักการของเซอร์อินฟราเรด” เข้าถึงได้จาก: <https://aleksandarhaber.com/noise-reduction-and-calibration-of-distance-sensors-sharp-infrared-sensors/>
- [3] “หลักการทํางานของพัดลมDC” เข้าถึงได้จาก: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/how-to-control-fan-speed.html>
- [4] “การเขียนโปรแกรม Arduino” เข้าถึงได้จาก: <https://www.arduino.cc/en/Guide/HomePage>
- [5] “การเขียนแอปพลิเคชัน Blynk” เข้าถึงได้จาก: <https://examples.blynk.cc/?board=ESP8266&shield=ESP8266%20WiFi&example=GettingStarted%2FBlynkBlink>
- [6] “แรงต้านอากาศ และอากาศพลศาสตร์” เข้าถึงได้จาก: <https://ienergyguru.com>
- [7] “กฎของนิวตัน” เข้าถึงได้จาก: <http://www.pw.ac.th/>
- [8] “พลศาสตร์ของไหล” เข้าถึงได้จาก: <http://www.rmutphysics.com>
- [9] “แรงโน้มถ่วง” เข้าถึงได้จาก: <http://narcotic.fda.moph.go.th/welcome/?p=6444>
- [10] “ระบบควบคุมพีไอดี” เข้าถึงได้จาก: <https://mall.factomart.com/how-to-control-a-temperature-controller/>
- [11] “การปรับจูนพีไอดี” เข้าถึงได้จาก: <https://thaicontrol.wordpress.com/2011/11/27/pid-tuning/>
- [12] วันชัย รุ่งรุจา, วิศวกรรมการควบคุมอิเล็กทรอนิกส์, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2557, 406 หน้า.
- [13] Jesus Chacon, Jacobo Saenz, Luis de la Torre, Jose Manuel Diaz and Francisco Esquembre, **Design of a Low-Cost Air Levitation System for Teaching Control Engineering**, University of Murcia, Spain, 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ก

เซนเซอร์ GP2Y0A21 Sharp Infrared Sensor 10-80 cm

■ Absolute Maximum Ratings (T_a=25°C, V_{CC}=5V)

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	V _{CC}	-0.3 to +7	V
Output terminal voltage	V _O	-0.3 to V _{CC} +0.3	V
Operating temperature	T _{opr}	-10 to +60	°C
Storage temperature	T _{stg}	-40 to +70	°C

รูปที่ ก.1 คุณสมบัติทั่วไปของเซนเซอร์วัดระยะทาง GP2Y0A21 (1)

■ Electro-optical Characteristics (T_a=25°C, V_{CC}=5V)

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Average supply current	I _{CC}	L=80cm (Note 1)	—	30	40	mA
Distance measuring	ΔL	(Note 1)	10	—	80	cm
Output voltage	V _O	L=80cm (Note 1)	0.25	0.4	0.55	V
Output voltage differential	ΔV _O	Output voltage difference between L=10cm and L=80cm (Note 1)	1.65	1.9	2.15	V

* L : Distance to reflective object

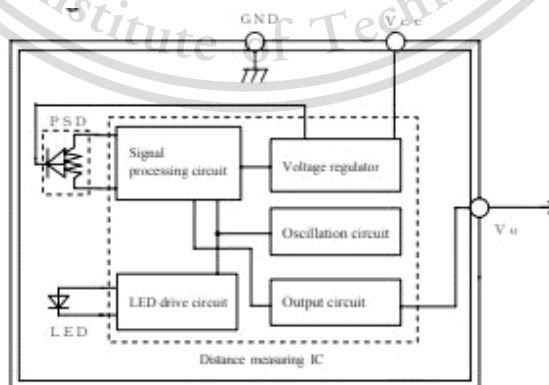
Note 1 : Using reflective object : White paper (Made by Kodak Co., Ltd. gray cards R-27·white face, reflectance; 90%)

รูปที่ ก.2 คุณสมบัติทั่วไปของ เซนเซอร์วัดระยะทาง GP2Y0A21 (2)

■ Recommended operating conditions

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	V _{CC}	4.5 to 5.5	V

รูปที่ ก.3 คุณสมบัติทั่วไปของเซนเซอร์วัดระยะทาง GP2Y0A21 (3)



รูปที่ ก.4 บล็อกไดอะแกรมของเซนเซอร์วัดระยะทาง GP2Y0A21

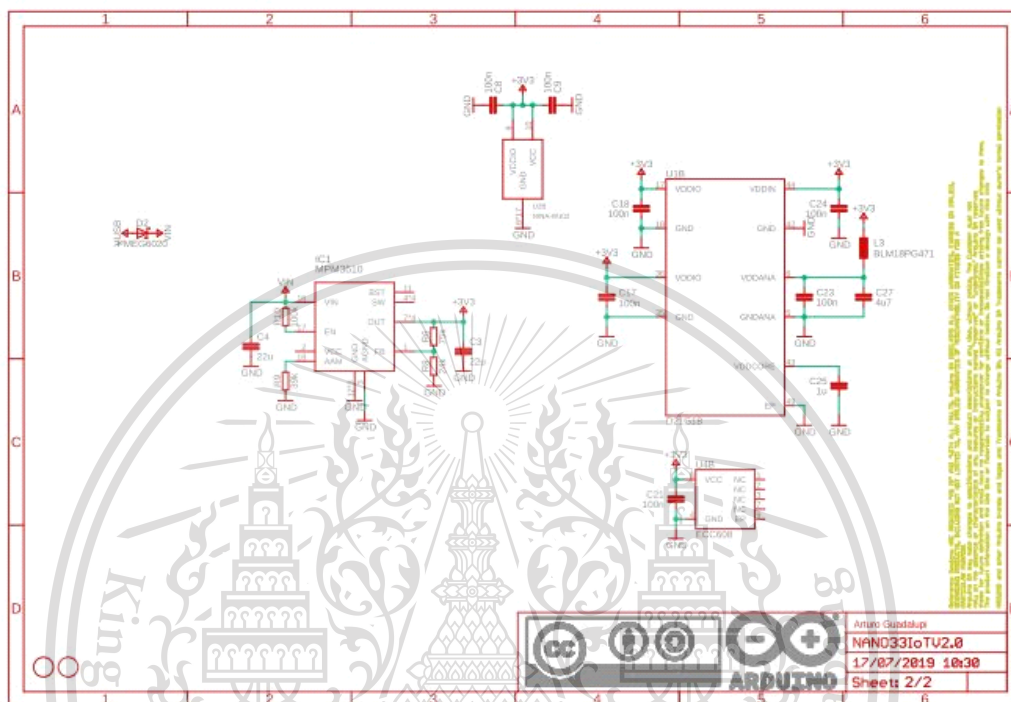
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

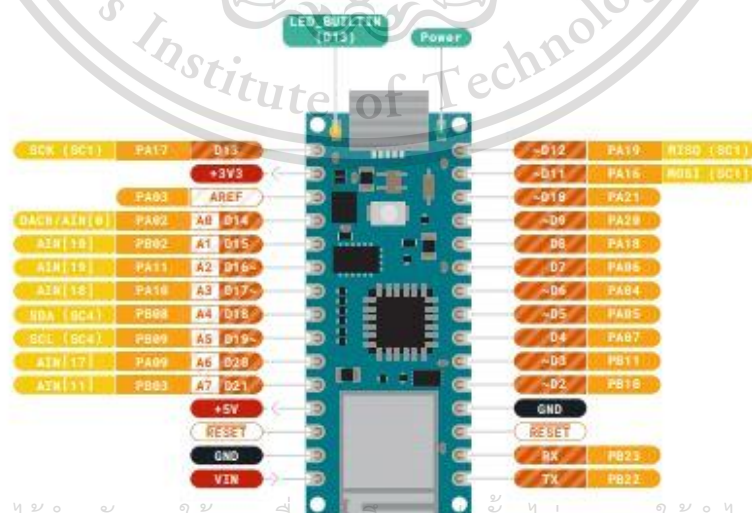
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ข

บอร์ด Arduino nano 33 IoT



รูปที่ ข.1 โครงสร้างภายในของบอร์ด Arduino nano 33 IoT

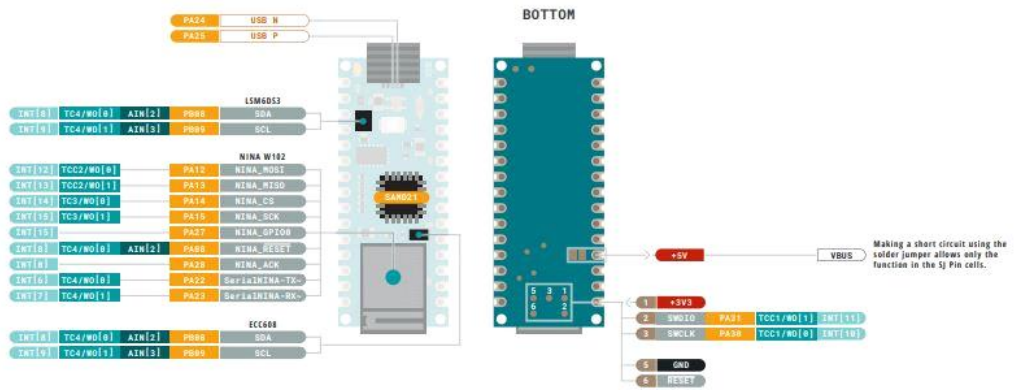


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.2 ตำแหน่งขาของบอร์ด Arduino nano 33 IoT

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ข.3 คุณสมบัติทั่วไปของบอร์ด Arduino nano 33 IoT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ค

โปรแกรมควบคุมการทำงานและการแสดงผล

```
#define BLYNK_PRINT Serial

#include <SPI.h>
#include <WIFIININA.h>
#include <BlynkSimpleWIFIININA.h>
#include "secrete.h"
BlynkTimer timer;
float pv;
//double kpapp, kiapp, kdapp;
int newdistance, newpv, newsetpoint, outputt, setpointt, kpapp, kiapp, kdapp, inputmanu,
manuall, innn;

//-----

#define PIN_OUTPUT 2
double Kp, Ki, Kd;
unsigned long lastTime;
double Input, Output, Setpoint;
double ITerm, lastInput, distance;
double kp, ki, kd;
int SampleTime = 100; //0.1 sec
double outMin, outMax;
int inAuto = false;

#define MANUAL 0
#define AUTOMATIC 1

#define DIRECT 0
#define REVERSE 1

int controllerDirection = REVERSE;
#define P_ON_M 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

#define P_ON_E 1
//int pOnE = P_ON_E;
int pOnE = true;
double PTerm;

//-----

void sensorr()
{
  Blynk.virtualWrite(V5, distance);
  newpv = map(distance, 10, 38, 100, 0);
  Blynk.virtualWrite(V6, newpv);

  //Blynk.virtualWrite(V9, Output);
  Blynk.virtualWrite(V7, setpointt);
  newsetpoint = map(setpointt,0,100,38,10);
  Blynk.virtualWrite(V8, newsetpoint);
  Blynk.virtualWrite(V2, Kp);
  Blynk.virtualWrite(V3, Ki);
  Blynk.virtualWrite(V4, Kd);

  Blynk.virtualWrite(V10, Output);
  outputt = map(Output,180,255,0,100);
  Blynk.virtualWrite(V9, outputt);
}

BLYNK_WRITE(V1)
{
  setpointt = param.asInt(); //0-100
}

BLYNK_WRITE(V11)
{
  kpapp = param.asInt();
  Blynk.virtualWrite(V14, kpapp);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

}
BLYNK_WRITE(V12)
{
  kiapp = param.asInt();
  Blynk.virtualWrite(V15, kiapp);
}
BLYNK_WRITE(V13)
{
  kdapp = param.asInt();
  Blynk.virtualWrite(V16, kdapp);
}
BLYNK_WRITE(V17)
{
  manuall = param.asInt();
}
BLYNK_WRITE(V18)
{
  inputmanu = param.asInt();
  innn = map(inputmanu, 0, 100, 180, 255);
}

void setup()
{
  Serial.begin(19200);
  pinMode(pv, INPUT);
  Blynk.begin(auth, ssid, pass);
  timer.setInterval(1L, sensorr);
}

void loop()
{
  Blynk.run();
  timer.run();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Setpoint= newsetpoint;
```

```
Input=analogRead(A1);
```

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

Serial.print("\t"); Serial.print(Input);
Kp=kpapp;
Ki=kiapp*0.0001;
Serial.print("\t Ki");
Serial.print(Ki, 4);
Kd=kdapp*0.0001;
Serial.print("\t Kd");
Serial.print(Kd, 4);
SetMode(manual);
SetControllerDirection(REVERSE);
SetOutputLimits(180, 255);
SetTunings();
//Dist();
Compute();
lastTime = millis()-SampleTime;
plot();
}

void Compute()
{
distance = map(Input,780,260,10,40);
if(!inAuto) return;
unsigned long now = millis();
int timeChange = (now - lastTime);
if(timeChange>=SampleTime)
{
/*Compute all the working error variables*/
double error = Setpoint - distance;
Serial.print("\t distance");
Serial.print(distance);
Serial.print("\t error");
Serial.print(error);
ITerm+= (ki * error);
Serial.print("\t ki");
Serial.print(ki);
if(ITerm > outMax) ITerm= outMax;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามนำไปใช้เพื่อการค้าโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

else if(ITerm < outMin) ITerm= outMin;
double dInput = (distance - lastInput);

Serial.print("\t kp");
Serial.print(kp);
//Compute P-Term
if(pOnE) Output = kp * error;
else
{
  PTerm -= kp * dInput;
  Output = PTerm;
}
Serial.print("\t kd");
Serial.print(kd); //ลบ
Serial.print("\t ITerm");
Serial.print(ITerm);
/*Compute Rest of PID Output*/
Output += ITerm - kd * dInput;
Serial.print("\t output");
Serial.print(Output);

if(Output<outMin)
{
  Output=outMin;
}
else if(Output>outMax)
{
  Output=outMax;
}

analogWrite(PIN_OUTPUT, Output);
Serial.print("\t output");
Serial.print(Output);
/*Remember some variables for next time*/
lastInput = distance;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

}

void SetTunings()
{
    if (Kp<0 || Ki<0|| Kd<0) return;

    pOnE == P_ON_E;

    double SampleTimeInSec = ((double)SampleTime)/100;
    kp = Kp;
    ki = Ki * SampleTimeInSec;
    kd = Kd / SampleTimeInSec;

    if(controllerDirection ==REVERSE)
    {
        kp = (0 - kp);
        ki = (0 - ki);
        kd = (0 - kd);
    }
}

void SetSampleTime(int NewSampleTime)
{
    if (NewSampleTime > 0)
    {
        double ratio = (double)NewSampleTime
            / (double)SampleTime;
        ki *= ratio;
        kd /= ratio;
        SampleTime = (unsigned long)NewSampleTime;
    }
}

void SetOutputLimits(double Min, double Max)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

outMax = Max;

if(Output > outMax) Output = outMax;
else if(Output < outMin) Output = outMin;

if(ITerm > outMax) ITerm= outMax;
else if(ITerm < outMin) ITerm= outMin;
}

void SetMode(int Mode)
{
    bool newAuto = (Mode == 1);
    if(newAuto == !inAuto)
    { //we just went from manual to auto
        Initialize();
    }
    if(newAuto == inAuto)
    {
        Output = innn;
        if(Output > outMax) Output = outMax;
        else if(Output < outMin) Output = outMin;
        analogWrite(PIN_OUTPUT, Output);
    }
    inAuto = newAuto;
}

void Initialize()
{
    lastInput = distance;
    PTerm = 0;
    ITerm = Output;
    if(ITerm > outMax) ITerm= outMax;
    else if(ITerm < outMin) ITerm= outMin;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่พิมพ์เผยแพร่บนเว็บไซต์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

if(inAuto && Direction !=controllerDirection)
{
    kp = (0 - kp);
    ki = (0 - ki);
    kd = (0 - kd);
}
controllerDirection = Direction;
}
void plot()
{
    Serial.print("\n");
    Serial.print(Setpoint);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(distance);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(Output);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(Kp);
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.